



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ НАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛНАМИ

А. И. БОНДАРЕНКО

Выполнена оценка величины амплитуды отраженных сигналов от несплошностей типа коррозионных поражений стенки трубы при контроле трубопроводов низкочастотными направленными волнами. Рассмотрены вопросы чувствительности систем УЗК трубопроводов, оценки дефектности пораженных коррозией труб при контроле протяженных трубопроводов.

The amplitude value of signals reflected from discontinuities of the type of corrosion damage of pipe wall was performed in pipeline testing by low-frequency directional waves. Considered are the questions of sensitivity of pipeline UT systems, assessment of defectiveness of corroded pipes at testing of extended pipelines.

В настоящее время во всем мире резко повысился объем исследований и разработок в области технологии и техники дистанционной дефектоскопии технического состояния протяженных трубопроводов. Существенным прогрессом в развитии дистанционной дефектоскопии протяженных трубопроводов явилось развитие технологии с использованием метода дальнего действия низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) направленными волнами. Основной задачей такой технологии является диагностика технического состояния трубопроводов различного назначения путем выявления уже в начальной стадии коррозионных поражений и эрозионного износа стенок труб.

Наибольшее развитие технология контроля трубопроводов различного назначения получила в середине 1990-х годов в Англии [1], США [2], а затем в Японии [3]. Анализ особенностей распространения НЧ УЗК направленных волн, систем диагностики трубопроводов различного назначения с использованием разных видов преобразователей для возбуждения направленных волн продольной и крутильной мод и приема отраженных эхо-сигналов от несплошностей в трубопроводах приведен в работе [4].

Адаптация адекватного метода контроля и мониторинга технического состояния протяженных трубопроводов, каким является метод дальнего действия НЧ УЗК направленными волнами, имеет большое значение для снижения потерь потенциально опасных продуктов, которые транспортируются по этим трубопроводам. В связи с увеличением объема транспортируемых продуктов потребность в таком добротном контроле будет со временем только возрастать. Большим преимуществом НЧ УЗК направленными волнами

является возможность 100%-го охвата при контроле стенок труб по всей длине диагностируемого участка трубопровода [5].

Рассмотрим основные технологические особенности метода НЧ УЗК направленными волнами, связанные с его возможностями по выявлению коррозионных поражений стенки трубы при диагностике и мониторингу технического состояния трубопроводов в процессе эксплуатации.

Виды отражателей в трубопроводах. Характерной особенностью протяженных трубопроводов является наличие в них различного рода несплошностей, связанных с изменением плотности материала и/или поперечного сечения стенок труб на границе их соединения и/или по длине трубы. Такие несплошности являются отражателями ультразвуковых направленных волн, которые распространяются вдоль осевой линии трубы. На рис. 1 приведена классификация видов отражателей в трубопроводе и схема их возможного размещения на трубе.

Все отражатели в трубопроводе можно разделить на два вида: симметричные и асимметричные. К симметричным относятся сварные швы, фланцы, опоры, патрубки и т. п., местоположение которых на трубопроводе известно согласно технической документации. Эхо-сигналы от симметричных отражателей являются важными метками для определения местоположения асимметричных отражателей. К асимметричным отражателям относятся дефектные участки трубы, обусловленные чаще всего повреждениями поперечного сечения стенки трубы из-за коррозии и эрозионного износа стенки трубы и расположенные по траектории распространения направленной волны. Коррозионные поражения стенки трубы ориентированы как вдоль окружности трубы, так и вдоль продольной оси трубы. Они могут находиться на внутренних и наружных поверх-

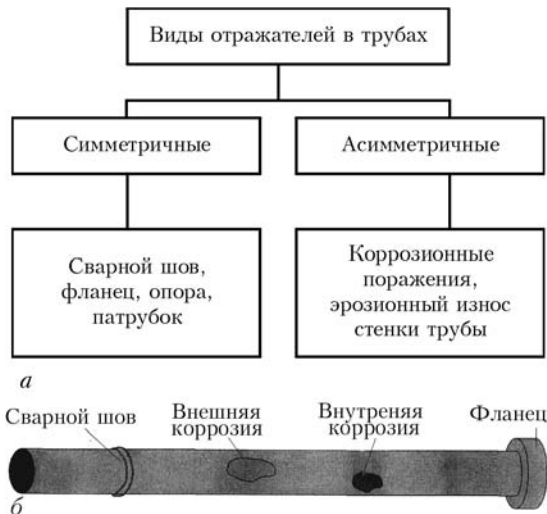


Рис. 1. Классификация видов отражателей в трубопроводе (а) и схема их возможного размещения на трубе (б)

ностях, однако распознать какая именно это поверхность с помощью дистанционного ультразвукового контроля невозможно. Повреждения, обусловленные эрозионным износом стенки трубы, чаще всего ориентированы вдоль продольной оси трубы и расположены со стороны внутренней поверхности. Асимметричные отражатели могут располагаться в различных местах трубы. Для идентификации их местоположения вдоль трубы служат эхо-сигналы от симметричных отражателей. При наличии дефектов в сварном шве, обусловленных деформацией формы шва и коррозионным поражением, они будут идентифицироваться синхронно со сварным швом.

Оценка амплитуды отраженных эхо-сигналов. Отраженные эхо-сигналы НЧ УЗ направленных волн в трубопроводе образуются вследствие изменения механического импеданса контролируемой трубы, которое возникает из-за влияния различных несплошностей на этот импеданс. Так, коррозионное поражение или эрозионный износ приводят к изменению площади поперечного сечения стенки трубы. При этом изменяется акустическое сопротивление трубы, которое показывает, по сути, степень сопротивления распространению ультразвуковых волн. Если при движении УЗ волна доходит до изменения сечения трубы, то определенная часть энергии падающей волны отражается к преобразователям. Для трубопровода из одинаковых материалов, когда плотность материала и скорость распространения волны не изменяются, акустический импеданс будет зависеть только от площади поперечного сечения трубы. В работе [6] получены выражения для определения коэффициентов отражения и прохождения по амплитуде падающей волны A_1 на границе изменения поперечного сечения трубы вследствие наличия в трубопроводе симметричных и асимметричных отражателей. Оценим за-

висимость амплитуды отраженной и прошедшей волн от степени изменения поперечного сечения трубы из-за действия коррозии. С учетом приведенных в работе [6] выражений (17) и (18) для определения коэффициентов отражения R и прохождения W направленной волны на границе изменения поперечного сечения стенки трубы вследствие ее коррозионного поражения, амплитуды отраженной B_1 и прошедшей A_2 волн будут определяться формулами вида:

$$B_1 = RA_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} A_1, \quad (1)$$

$$A_2 = WA_1 = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} A_1. \quad (2)$$

Из выражения (1) видно, что амплитуда отраженной волны пропорциональна разности площадей $S_1 - S_2$, т. е. зависит от размеров пораженной коррозией площади поперечного сечения стенки трубы. Это значит, что низкочастотная направленная волна чувствительна к потерям металла в поперечном сечении трубы. Из выражения (1) также следует, что коэффициент отражения по амплитуде, обусловленный скачком поперечного сечения трубы из-за наличия дефекта, значительно меньше, чем отношение поперечных сечений S_2/S_1 . Поэтому направленная волна распространяется дальше вдоль трубы и только небольшая ее часть отражается от скачка поперечного сечения трубы.

Если принять, что поперечные сечения в месте дефекта отличаются в два раза, т. е. $S_2 = S_1/2$, то амплитуда отраженной волны B_1 будет равна:

$$B_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} A_1 = \frac{S_1/2}{3S_1/2} A_1 = \frac{1}{3} A_1. \quad (3)$$

В этом случае амплитуда прошедшей волны A_2 будет равна:

$$A_2 = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} A_1 = \frac{2S_1}{3S_1/2} A_1 = \frac{4}{3} A_1. \quad (4)$$

Оценим, какая часть энергии возбужденной волны отражается при соотношении сечений $S_2 = S_1/2$. Известно [7], что коэффициент отражения R_3 падающей плоской звуковой волны на границе изменения поперечного сечения объекта с одинаковыми материальными постоянными, оцениваемый по энергии, равен:

$$R_3 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2. \quad (5)$$

В общем случае это означает, что только небольшая часть энергии звуковой волны отражается от дефекта обратно, а значительная часть



энергии проходит дальше по трубе. Для соотношения сечений трубы $S_2 = S_1/2$ из выражения (3) значение отраженной энергии звуковой волны будет равно:

$$\left(\frac{B_1}{A_1}\right)^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что если сечения доброкачественной и пораженной дефектом трубы отличаются в два раза, то только 1/9 часть падающей энергии отражается обратно. При этом, согласно данным работы [8], удовлетворяется закон сохранения энергии: разность энергий падающей и отраженной волны должна быть равна энергии прошедшей волны. Поскольку плотность энергии пропорциональна квадрату амплитуды, то выполняется следующее соотношение:

$$S_1(A_1^2 - B_1^2) = A_2^2 S_2. \quad (7)$$

Хотя только незначительная часть энергии звуковой волны отражается обратно от дефектов, амплитуда отраженного эхо-сигнала является основным параметром, положенным в основу создания систем НЧ УЗК направленными волнами.

Высота отраженных эхо-сигналов, по сути, соответствует степени изменения площади поперечного сечения трубы под действием коррозии, т. е. зависит от размера дефекта. При увеличении размера дефекта увеличивается также длительность (ширина) эхо-сигнала. Соответствие амплитуды отраженных сигналов степени изменения площади поперечного сечения трубы из-за действия коррозии является фундаментальной технологической особенностью дефектоскопии протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами, которые распространяются по толщине стенки трубы вдоль ее продольной оси. Таким образом, достоверно подтвердить наличие (отсутствие) повреждений может только соответствующая форма принимаемых отраженных сигналов. Однако точно определить размеры повреждения, его тип, степень опасности и т. п. почти невозможно, даже если известно его местоположение по длине трубы.

Чувствительность технологии НЧ УЗК. В процессе развития технологии дальнедействующего УЗК направленными волнами основной целью была демонстрация чувствительности метода при определении внешней коррозии под изоляцией и внутренней коррозии в трубе протяженных трубопроводов. Исследования проводили на системных трубопроводах с изоляцией и технологических трубопроводах диаметром 50... 300 мм [1, 9], при передаче газа по трубам большого диаметра [10]. Минимально требуемой чувствительностью было определение коррозии на глубину

50 % толщины стенки, а также области $D/2 \times D/2$ (D — диаметр трубы), что составляло приблизительно 9 % площади поперечного сечения трубы на расстоянии не менее 15 м от места установки преобразователей акустической антенны. Поскольку коррозию можно рассматривать как глубокие выемки небольшой площади, то в процессе исследований ставилась также задача проверить чувствительность метода при определении коррозии глубиной 50 % толщины стенки и области $3t \times 3t$ (t — толщина стенки), что составляло приблизительно 3 % площади поперечного сечения стенки трубы.

Исследования и испытания, основанные на моделировании с использованием различных моделей несплошностей, показали, что распространяющиеся в трубах направленные волны могут быть использованы для определения коррозионного поражения трубопроводных систем различного назначения.

В работе [11] приведены результаты теоретических и практических исследований для определения отражений от потерь поперечного сечения трубы диаметром 76 мм. Частота возбуждаемого сигнала составляла 70 кГц. При исследовании использовали искусственные дефекты в виде паза 50 % толщины стенки как функция длины окружности и паза шириной больше 11 % длины окружности как функция глубины дефекта. Затем эти исследования были расширены и на больший размерный диапазон дефектов, обеспечивая, таким образом, пакет данных о найденных отражениях. На рис. 2 приведена зависимость между амплитудой отраженного сигнала и площадью дефекта как пропорцией поперечного сечения стенки трубы.

Из рисунка видно, что не все точки, соответствующие амплитуде отраженного сигнала при одной и той же площади дефекта, лежат на средней линии. Было высказано предположение, что глубокие дефекты с малой длиной по окружности трубы дают большее отражение, чем длинные по окружности, но неглубокие той же площади. Это теоретическое предположение было экспериментально проведено на трубах диаметром 76 и 200 мм, содержащих искусственные дефекты в виде пазов известных площадей поперечного сечения. В большинстве случаев практические результаты были близки к прогнозируемым, поэтому приведенная на рис. 2 зависимость была использована как база для описания чувствительности метода УЗК направленными волнами в системе Teletest [11]. Из зависимости рис. 2 видно, что в диапазоне от 10 до 50 % площади пораженного дефектом поперечного сечения трубы кривая чувствительности изменяется более плавно. В диапазоне от 3 до 9 % чувствительность метода проявляется сильнее.

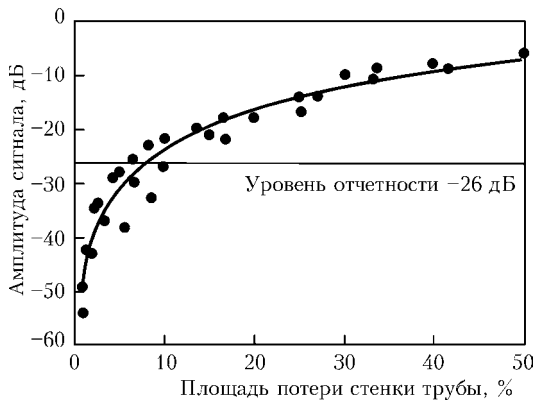


Рис. 2. Зависимость амплитуды отраженного сигнала от площади потерь металла (кружочки — отражения от дефектов; кривая — наилучшая сходимость зависимости)

Подтверждения о возможности с помощью длинноволнового УЗК обнаруживать небольшие потери металла на уровне 3 % поперечного сечения трубы приведены в более ранней работе [1]. В работе [12] также подтверждается возможность приема отраженного эхо-сигнала от реального эталонного отражателя на уровне 4 % дефектности поперечного сечения трубы. Поэтому в системе Teletest в качестве протоколируемого уровня отраженного эхо-сигнала была принята амплитуда, соответствующая 9 % площади поперечного сечения трубы. Если четкие индикации обнаруживаются ниже протоколируемого уровня, их определяют как малые дефекты.

Подтверждение выбранных порогов системы Teletest осуществлялось путем проведения исследовательских работ по европейскому проекту RACH, возглавляемому Лондонским университетом [13]. Основная часть работы состояла в сборе данных о неразрушающем контроле (НК) образцов труб, пораженных коррозией, с использованием восьми методов НК для сравнения их способности обнаружения дефектов. Испытания проводили «вслепую», без знания существующих дефектов. Оценка результатов исследований осуществлялась независимой группой из Бюро Veritas (Париж). На рис. 3 приведены результаты оценки 36 разных дефектов для труб диаметром 150 мм. График построен в виде зависимости глубины поражения дефектами стенки трубы от длины по окружности и показывает обнаруженные и не обнаруженные дефекты. Кривые отражают дефекты на уровне 3 и 9 % площади поперечного сечения трубы.

Графики на рис. 3 показывают, что при «слепых» условиях контроля система Teletest работает как ожидалось. Очевидно ограниченное обнаружение дефектов при 3 % уровне и ниже его. Данные показывают классическую вероятность характеристик обнаружения, которая увеличивается в области выше уровня, соответствующего 3 % поперечного сечения трубы. Все контролируемые

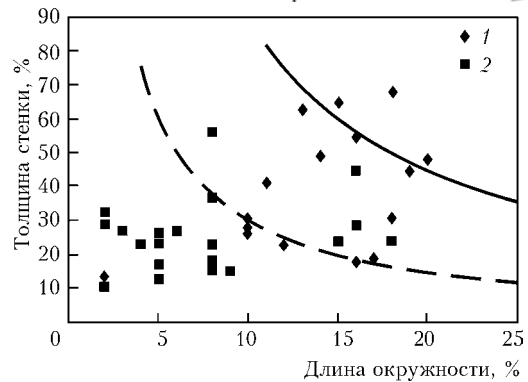


Рис. 3. Результаты выявления дефектов системой Teletest как зависимости глубины поражения стенки трубы от длины по окружности: 1 — обнаруженные; 2 — не обнаруженные дефекты; сплошная линия — граница 9%-й зоны; штриховая — 3%-й зоны

дефекты вокруг и выше 9 % уровня были обнаружены. Эти результаты очень важны, так как они демонстрируют возможности работы системы Teletest на известных образцах с известными дефектами и могут быть воспроизведены при проведении диагностики трубопроводов с коррозией в неизвестных местах.

Такие же исследования были проведены на трубах диаметром 600 мм (толщина стенки 8,74 мм) на 86 видах моделей дефектов, выполненных механическим путем [14]. В этом случае были обнаружены дефекты значительно ниже кривой 9 % площади поперечного сечения трубы, а также дефекты ниже, чем 3 % площади. Результаты этих исследований показали, что в случае трубы с большим диаметром минимальная чувствительность к обнаружению потерь металла стенок, эквивалентная 9 % площади поперечного сечения, выше, а практическая цель обследования 3%-й площади стенки трубы была достигнута для большинства случаев. Как следует из работы [11], чувствительность к дефектам выше на линиях больших диаметров труб, когда отношение диаметра к толщине стенки трубы намного больше, чем при малых диаметрах труб. Однако на трубах большого диаметра достаточно сложно обнаружить небольшие отдельные участки коррозии, так как размер каждого коррозионного поражения не пропорционален внутреннему диаметру трубы [14].

Наиболее важным является то, что метод и технология НЧ УЗК является методом качественной дистанционной визуализации местоположения дефектов и чувствителен к уменьшению поперечного сечения трубы, т. е. к любым потерям металла в комбинации глубины и длины по окружности трубы из-за коррозионного поражения или эрозийного износа. Это достигается благодаря передаче круговой волны вдоль стенки трубы, которая взаимодействует с поперечным сечением в каждой точке. При этом технология НЧ УЗК в



равной степени чувствительна к дефектам на внутренней и внешней поверхностях трубы. Однако пораженная часть стенки трубы плохо обнаруживается дальнедействующим методом в направлении осевой линии трубы. Это объясняется тем, что направленная волна при распространении ударяется в границу изменения сечения трубы и сразу же отражается, хотя от длинного дефекта в направлении осевой линии трубы может отразиться более сильный сигнал, чем от короткого при условии достаточно большого размера окружности трубы [11]. В то же время длинные дефекты в осевом направлении трубы могут привести к снижению прочности трубы.

Представление информации о несплошностях в системах НЧ УЗК. Приведенные выше результаты практических исследований чувствительности НЧ направленных волн при отражении от различных дефектов были использованы как база для создания технологии Teletest [15]. Teletest — это технология дистанционного НК, которая представляет собой эхо-импульсную систему для контроля больших объемов материала из одной точки установки преобразователей. Направленные волны, отраженные от дефекта, принимаются пьезопреобразователями и после усиления, обработки и подавления помех выводятся на экран персонального компьютера как выпрямленные сигналы в виде A-scan зависимости амплитуды от расстояния, подобно используемым при обычном ультразвуковом контроле, но во временном диапазоне измерения, соответствующем десяткам метров, а не сантиметров. Так как направленные волны несут дисперсионный характер, то при калибровке временной шкалы A-scan для считывания расстояния, а не времени, в системе Teletest имеется компьютерная программа определения скорости распространения волны для выбранной частоты испытаний из калибровочной или «дисперсионной» кривой. В программное обеспечение Teletest встроена библиотека дисперсионных кри-

вых, которые имеют разный вид в зависимости от сочетания «диаметр трубы/толщина стенки». Обычно на дисплей наложены кривые коррективы «расстояние — амплитуда», предназначенные для временной регулировки чувствительности и отображающие линии равной чувствительности при равном расстоянии от преобразователей.

На рис. 4 приведен формат дисплея системы Teletest [15] для трубы длиной 36 м, который подобен дисплею обычного УЗК. По горизонтали — расстояние от преобразователей или начала отсчета, по вертикали — амплитуда отраженного сигнала. Дисплей A-scan используется оператором для интерпретации результатов контроля. На A-scan системы Teletest выведены четыре кривые коррективы «расстояние — амплитуда»:

кривая 1 (0 дБ). Конец трубы или фланец играет роль почти идеального отражателя. Это можно продемонстрировать на единичном отрезке трубы в лаборатории и использовать для установки абсолютной стандартной чувствительности. Эту эталонную величину обычно называют отражатель 0 дБ;

кривая 2 (–14 дБ). Сигналы от кольцевых сварных швов на трубе, которые постепенно затухают с расстоянием, образуют идеальные отражатели для задания кривой коррективы. Опыт использования системы Teletest показывает, что кольцевой шов с обычным профилем верхнего и корневого прохода имеет отражательную способность, эквивалентную до 20 % (–14 дБ) сигнала от конца трубы. Пока существуют небольшие колебания от шва к шву, это положение хорошо подтверждается на практике;

кривая 3 (–26 дБ). Явление потери металла с площадью поперечного сечения, эквивалентной до 9 % поперечного сечения стенки трубы имеет отражательную способность, эквивалентную до 5 % (–26 дБ) отражения от конца трубы. Этот пороговый уровень, видимый на A-scan в качестве кривой 3, используется для определения аномалий. Аномалии, которые дают сигналы, близкие, но не превышающие кривую –26 дБ, обычно рассматриваются как незначительные, превышающие кривую –26 дБ, описываются как умеренные, значительно превышающие кривую –26 дБ (настолько, что они достигают линии –14 дБ), рассматриваются как серьезные;

кривая 4 (–32 дБ). Кривая 4 используется как детерминанта эффективного диапазона тестирования. Это позволяет выявляемой аномалии (–26 дБ) иметь коэффициент сигнал-шум 6 дБ или лучше. Такой уровень отношения сигнала к шуму необходим для эффективной интерпретации данных теста и практически играет роль предела как диапазона

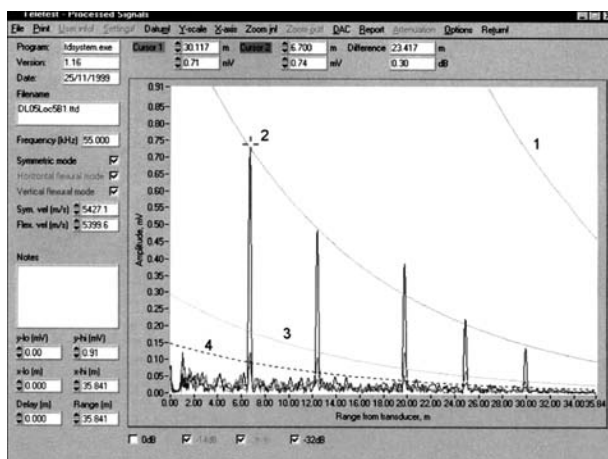


Рис. 4. Формат дисплея A-scan системы Teletest для трубы длиной 36 м

тестирования, так и чувствительности к меньшим аномалиям.

На дисплее ниже уровня -26 дБ записаны наложенные друг на друга три кривые, принцип образования которых при отражении направленной волны от симметричных и асимметричных отражателей приведен на рис. 5.

Основная кривая — это прямоотраженный (продольная $L(0,2)$ мода) сигнал от несплошностей. Если сварной шов трубопровода является симметричным относительно трубы, то отраженный сигнал состоит из той же волновой моды, которая распространяется по трубопроводу. Наличие дефектов типа коррозионного поражения стенки трубы приводит к преобразованию (конвертации) направленной волны. Это значит, что отраженная волна будет состоять из моды падающей продольной волны и конвертированной (изгибной) волны, так как последние вызывают изгиб трубы вследствие их возникновения от неоднородного источника. Наличие таких отраженных эхо-сигналов является явным свидетельством присутствия в стенке трубы таких несплошностей, как коррозия. Приведенные на дисплее (рис. 4) две другие кривые являются вертикальной и горизонтальной компонентами мод конвертированных сигналов, образующихся, когда продольная мода отражается от шероховатых и/или асимметричных несплошностей. Наличие уровней амплитуд (выше 9 %) мод конвертированных сигналов означает наличие дефектов и является главным фактором процесса их интерпретации в протяженных трубопроводах. Для интерпретации дефектов по отраженным эхо-сигналам оператор выбирает соответствующие сигналы на экране А-scan при помощи курсора. Программа автоматически измеряет пик сигнала как значение выше или ниже кривой корректировки — 26 дБ и расстояние до переднего края эхо-сигнала от центра линии преобразователей.

Оценка дефектности пораженных коррозией труб. Анализ изложенных выше исследований амплитуды эхо-сигналов, отраженных от реальных дефектов и искусственных моделей дефектов, дает возможность в некоторой степени судить о глубине поражения стенки трубы в зависимости от изменения площади поперечного сечения трубы [11]. Однако эта технология не обеспечивает такого разрешения как измеренная по месту оставшаяся толщина стенки трубы, пораженная дефектом.

Высота отраженных эхо-сигналов от дефектов соответствует степени изменения площади поперечного сечения трубы под действием коррозии. Эта информация о дефектах определяется ультразвуковыми направленными волнами, которые распространяются вдоль продольной оси трубы. Амплитуда отраженного от дефекта сигнала ха-

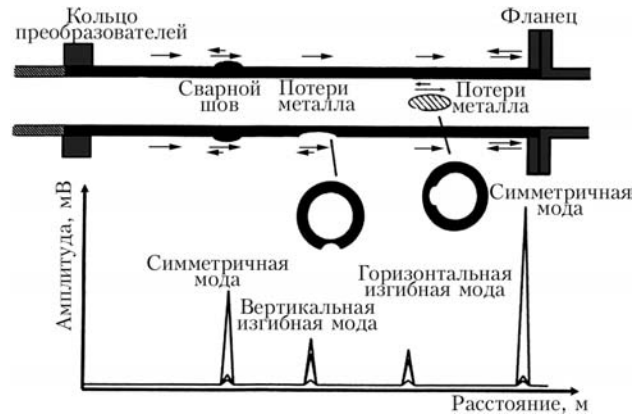


Рис. 5. Принцип отражения направленной волны от симметричных и асимметричных отражателей

рактеризует степень дефектности поперечного сечения трубы. Степень дефектности D определяется по цилиндрическому сечению трубы в процентном отношении площади дефекта S_d по всей площади поперечного сечения трубы $S_{тр}$, т. е.

$$D = \frac{S_d}{S_{тр}} 100 \%. \quad (8)$$

Информация о толщине стенки трубы определяется при ультразвуковом измерении толщины. При этом ультразвуковые волны направлены по толщине перпендикулярно оси трубы. Поэтому в информацию об амплитуде отраженного эхо-сигнала направленной волны не входит глубина коррозии, которая в принципе является информацией, получаемой по толщине. Глубина коррозии характеризует степень H утонения стенки трубы, которая определяется в процентном отношении глубины коррозии h к номинальной толщине t стенки трубы, т. е.

$$H = \frac{h}{t} 100 \%. \quad (9)$$

Прямой корреляционной зависимости между данными о дефектах, полученными направленными волнами, и данными о глубине утонения, полученными при измерении толщины стенки, нет. Покажем это на примере поражения коррозией поперечного сечения трубы равной площади с различной глубиной.

На рис. 6 приведена схема поражения коррозией поперечного сечения трубы равной площади с различной глубиной со стороны внутренней поверхности трубы.

Примем, что площади пораженного дефектом сечения $S_{д1} = S_{д2} = S_{д3}$, а степень дефектности стенки трубы $D = 9 \%$. Применительно к трубе с наружным диаметром $d_n = 114$ мм и толщиной стенки $t = 6$ мм глубина утонения стенки при наличии равномерной коррозии по всему внутреннему диаметру трубы составит $h_1 = 0,54$ мм (рис. 6, а). Если предполагается концентрация

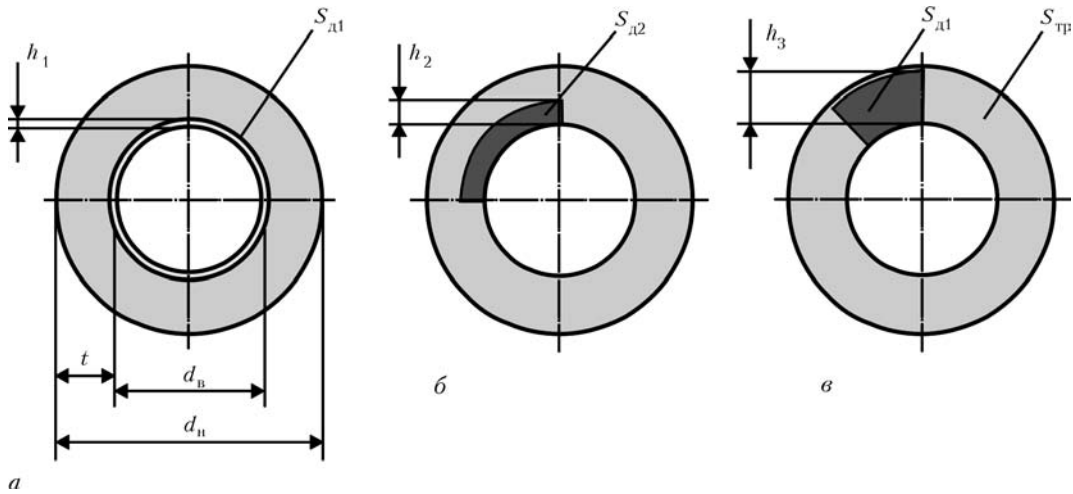


Рис. 6. Схема поражения коррозией внутренней поверхности трубы равной площади с различной глубиной

коррозии на 1/4 окружности трубы (рис. 6, б), тогда оценочное значение глубины утонения составит $h_2 = 2,16$ мм. При концентрации коррозии на 1/8 окружности трубы (рис. 6, в) значение глубины утонения будет $h_3 = 4,32$ мм.

Исходя из этого, нельзя утверждать, что существует прямая зависимость между площадью поражения поперечного сечения трубы и глубиной утонения стенки. Направленная волна в общем случае чувствительна к изменению площади поперечного сечения в комбинации глубины поражения стенки и длины вдоль окружности трубы, что и подтверждают исследования в работе [11]. Хотя глубокий дефект той же площади с малой длиной по окружности трубы может давать большее отражение, однако информацию о степени поражения площади поперечного сечения трубы амплитуда отраженного сигнала несет в целом и из этой информации невозможно обосновать информацию о глубине поражения стенки трубы. Такую информацию могут дать другие физические средства измерения стенки трубы, например, ультразвуковая толщинометрия. На рис. 7 приведена схема алгоритма оценки степени дефектности и утонения стенки поперечного сечения трубы.

Пусть коррозионное поражение стенки трубы выявлено длинноволновым ультразвуковым дефектоскопом, а глубина утонения стенки измерена ультразвуковым толщиномером. О наличии коррозионного поражения и степени поражения стенки трубы судят по амплитуде отраженного эхо-сигнала, которая измеряется в мВ. Такая оценка степени дефектности стенки трубы является качественной. Величина утонения (толщина) стенки трубы измеряется в мм, поэтому оценка степени утонения стенки трубы является количественной. Между этими величинами нет полной корреляции, так как измеряются разные физические параметры. Произвести оценку глубины утонения по амплитуде сигнала в некоторой степени можно,

если известен вид коррозии. Если же на практике вначале проводится первичный контроль трубопровода, выполнить это трудно. В дальнейшем такая связь может быть установлена в процессе мониторинга технического состояния трубопроводов в результате формирования картины развития коррозионных поражений, накопления и анализа фактических статистических данных о де-



Рис. 7. Схема алгоритма оценки степени дефектности и утонения поперечного сечения трубы



Рис. 8. Комплексные методы диагностики и контроля технического состояния трубопроводов

фектах с использованием средств дальнодействующего УЗК направленными волнами и средств локального НК. Это значит, что для решения задач технологии трубопроводов НЧ направленными волнами необходимо поддерживать обратную связь по фактическим статистическим данным, с помощью которой между данными по направленным волнам и данными по типу коррозии (степени коррозионного утонения) может быть установлена корреляционная зависимость.

Высказанные соображения подтверждаются исследованиями, приведенными в работе [12]. Исходя из этого, может быть предложена общая схема комплекса методов диагностики и НК технического состояния трубопроводов различного назначения при использовании для обнаружения дефектов дальнодействующего УЗК НЧ направленными волнами, которая приведена на рис. 8.

После полного контроля всей длины трубопровода участки, на которых была обнаружена коррозия, оценивают путем измерения толщины ультразвуковым толщиномером или другими методами контроля (радиографическим, вихретоковым), после чего при необходимости определяют точки для постоянного наблюдения и мониторинга технического состояния трубопровода.

Следует также отметить, что применение технологии и техники дальнодействующего УЗК направленными волнами требует полного понимания факторов, которые влияют на результаты контроля, практического опыта интерпретации результатов.

Выводы

1. Показано, что при контроле протяженных трубопроводов только незначительная часть падающей направленной волны отражается от различных видов несплошностей.

2. Чувствительность современных систем НЧ УЗК для надежной диагностики протяженных трубопроводов составляет 9 % потери металла в поперечном сечении трубы.

3. Амплитуда отраженного эхо-сигнала не несет информации о глубине поражения стенки трубы, так как оценка дефектности трубы направленными волнами является качественной, а измененная по месту глубина является количественной, поэтому между этими величинами нет полной корреляционной связи.

1. Mudge P. J., Lank A. M., Allyn D. N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. — Thepmie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26–28 Nov., 1996.
2. Rose I. L. Ultrasonic waves in solid media // Cambridge University Press. — New York, 1999. — P. 77–82.
3. Hagan T., Hedo M., Takemura K. Практика применения направленных волн в ультразвуковой дефектоскопии / Хикакай Кэйсону. — 2003. — 52, № 12. — С. 667–671.
4. Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
5. Patel R., Rudlin J. Analysis of corrosion/erosion incidents in offshore process plant, and implications for non-destructive testing // Insight. — 2000. — 42, № 1.
6. Бондаренко А. И. Исследование механизмов взаимодействия низкочастотных направленных волн с несплошностями трубопроводных систем / Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 1. — С. 18–25.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1957. — 727 с.
8. Скучик Е. Основы акустики / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976, т. 1. — 520 с.
9. Alleyne DN., Cawley P., Mudre P. J. The development of a quick method for the detection of corrosion and pitting in pipework. Final report for the LINK Industrial Measurement Systems Programme. — TWI report 88157/33/95, January 1995.
10. Mudre P. J., Lank A. M. Detection of corrosion in pipes and pipelines. ASNT International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology Topical Conference V, Houston, Texas, 16–19 June 1997.
11. Report. Long Lunge Ultrasonic testing technique — performance details / Document reference: TTP/01. May 2001. — 20 с.
12. Техника контроля направленными волнами для эксплуатационного контроля заводских трубопроводов / Т. Икэда, Р. Канэхара, М. Миядзава и др. // Hinakai Kensa. — 2005. — 54, № 11. — P. 595–599.
13. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. — Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.
14. Topical Report GRI-94/0381: GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect Set / M. J. Koenig, T. A. Bubenik, S. W. Rust, J. B. Nestleroth // Gas rezearch Institute, April 1995.
15. Long Lunge Ultrasonic test system. Section 1. System Overview and Principles of Operation. — Sept., 2004. — 6 с.