



## Сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла и сварных швов

В статье описаны технологии ультразвуковой толщинометрии трубопроводов с применением фазированных антенных решёток и измерения профиля донной поверхности трубопроводов с применением фазированных антенных решёток, работающих по схеме TOFD (time-of-flight diffraction). Приведены результаты измерения с применением этих технологий. Также описаны перспективы развития методов с использованием технологии цифровой фокусировки антенны.

Submitted 16.06.14

Accepted 24.11.14

A. E. Bazulin\*, H. Benites\*\*, V. V. Pronin\*, D. S. Tikhonov\*, O. O. Shnel\*\*\*

### Continuous Ultrasonic Thickness Measurement of Main Metal and Welded Joints

The problems of sampling ultrasonic thickness measurement are considered in this article. The application of methodologies and technologies using phased arrays are considered.

The principles of application of continuous thickness measurement of pipeline main metal and also measurement of pipeline welded joints bottom surface profile using antenna arrays technology and TOFD (time-of-flight diffraction) scheme are described. The simulations of the inspection scheme basic parameters of the technologies is carried out by the method of ray tubes with application the verified software CIVA. Examples of application and technologies measurement results on test blocks are given in the article. The development perspectives of methods using digital antenna focusing for visualization and measurement of bottom surface profile are described.

*Keywords:*

#### Введение

Трубопроводы в процессе эксплуатации подвержены эрозионно-коррозионному износу. Под воздействием теплоносителя происходит эрозионное разрушение защитной оксидной плёнки на внутренней поверхности, что способствует протеканию процесса коррозии, возникновению коррозионных трещин, в результате чего происходит разрушение металла стенки трубопровода. Одним из примеров эрозионно-коррозионного износа трубопровода является разрыв трубопровода в турбинном отделении АЭС Михама (Япония) в 2004 г. [1].

Для обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации АЭС необходимо использование современных достижений технологий ультразвукового неразрушающего контроля и диагностики металла стенок и сварных соединений трубопроводов. Одним из таких направлений является сплошная ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) основного металла и сварных швов с применением антенных решеток (АР). В отличие от выборочной УЗТ, применение автоматизированных сканирующих устройств при контроле позволяет увидеть и зафиксировать полную картину состояния металла.

Сотрудники ООО «НПЦ «ЭХО+», г. Москва

**БАЗУЛИН**  
Андрей Евгеньевич

Начальник лаборатории, к. т. н. Научные интересы – разработка и применение автоматизированных систем контроля с визуализацией дефектов.



**ПРОНИН**  
Виталий Владимирович

Младший научный сотрудник, аспирант.



**ТИХОНОВ**  
Дмитрий Сергеевич

Технический директор, к. т. н. Научные интересы – методология и средства автоматизированного УЗК для промышленных объектов повышенной опасности.



**БЕНИТЕС**  
Хорхе

Ведущий менеджер DEKRA Industrial AB (Швеция).



**ШНЕЛЬ**  
Олег Оскарович

Старший мастер ОДМТК Ленинградской АЭС.



\* Scientific Production Center of Nondestructive Ultrasonic Testing «ECHO+» Co Ltd, Moscow, Russia

\*\* DEKRA Industrial AB, Göteborg, Sweden

\*\*\* Leningrad NPP, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

На рынке представлены различные средства для сплошной УЗТ на основе АР в режиме электронного сканирования (рис. 1), которые позволяют за один проход измерять толщину в полосе, ширина которой определяется количеством элементов в антенной решетке. Применение электронного сканирования АР значительно экономит время по сравнению с механическим сканированием, что является важным фактором, в том числе для работы в условиях ионизирующего излучения.

Выбор параметров АР для задач толщинометрии обоснован ниже.

В 2013 г. ООО «НПЦ «ЭХО+» совместно с Dekra Industrial (Швеция) были разработаны технологии и средства УЗТ. Работа велась по двум направлениям:

1. сплошная ультразвуковая толщинометрия основного металла трубопроводов с применением антенных решеток;
2. построение профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с применением антенных решеток, применяемых по схеме TOFD (Time of flight diffraction).

**Сплошная УЗТ основного металла трубопроводов**

Объектом контроля (ОК) является основной металл перлитных трубопроводов с наружными диаметрами  $\varnothing$  159–426 мм, гибы и конусные переходы. Диапазон контролируемых толщин стенок трубопроводов составляет от 2 до 60 мм.

Измерение толщины проводится с использованием технологии ультразвуковых фазированных антенных решеток эхо-импульсным ультразвуковым методом с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств. Обеспечить относительно широкую полосу измерения толщины трубопровода позволила схема контроля, при которой АР движется вдоль оси трубопровода и ориентирована поперек направлению сканирования (рис. 1).

В процессе измерений применяются АР, установленные на плосковогнутые призмы, контактная поверхность которых имеет вогнутую поверхность (рис. 2). При контроле используют продольную волну, сфокусированную на номинальную толщину ОК, и электронное сканирование, обеспечиваемое при подключении к дефектоскопу, поддерживающему технологию контроля фазированными АР.

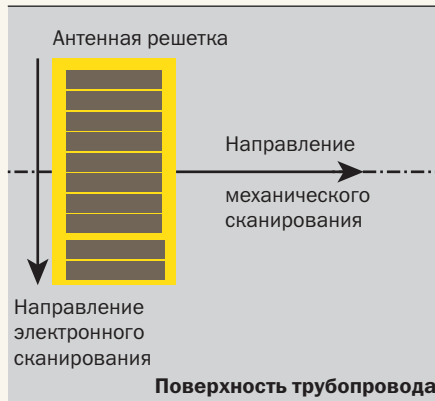


Рис. 1. Схема толщинометрии основного металла трубопроводов

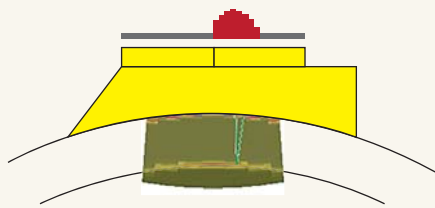


Рис. 2. Электронное сканирование вдоль апертуры АР

Для проведения толщинометрии основного металла трубопроводов по предложенной схеме контроля было разработано механизированное двухкоординатное сканирующее устройство на магнитных колесах (рис. 3) с возможностью установки на трубопроводы с наружными диаметрами  $\varnothing$  159–426 мм, а также на гибы и конусные переходы. Использование нестандартной схемы контроля, изображенной на рис. 2, привело к необходимости обоснования параметров и настроек применяемого оборудования.

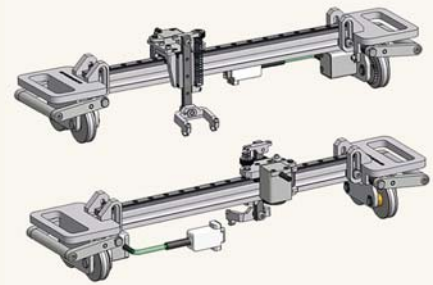


Рис. 3. Сканер для выполнения толщинометрии основного металла

Выбор оптимальных параметров схемы контроля был сделан исходя из результатов расчетов в программной среде CIVA 10.1 с применением ультразвукового модуля. Пример расчета модели показан на рис. 4. При выбранной схеме контроля для измерения толщины используются два эхо-сигнала: отраженный от внутренней поверхности трубопровода (начальный) и первый донный. По результатам моделирования были сформулированы следующие выводы:

- оптимальным является использование 32-х элементной решетки с шагом 1 мм;
- при фокусировке на номинальную толщину ОК достигается минимальная погрешность измерения, которая не изменяется при уменьшении толщины до 50% от номинальной с сохранением фокусировки на номинальную толщину.

При выборе толщины  $h$  призмы, представляющей линию задержки, необходимо найти компромисс между минимально возможным значением толщины  $h$ , при котором первый дон-

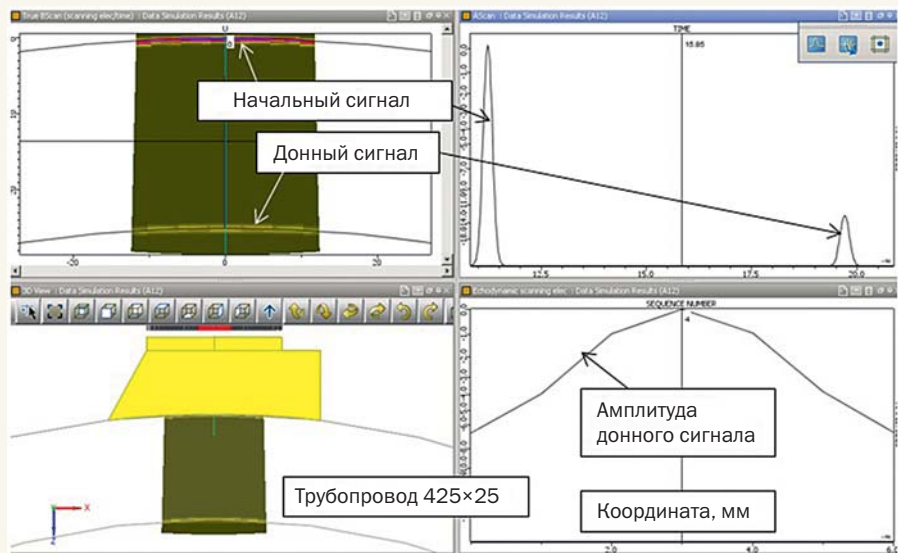


Рис. 4. Пример расчета модели в среде CIVA. Объект контроля — трубопровод 425 × 25 мм, задержка (призма) высотой 15 мм

ный сигнал от ОК отчетливо выявляется на фоне переотраженных в призме сигналов, и эффектом увеличения погрешности измерения и уменьшения амплитуды донного сигнала из-за отклонения угла падения на границу раздела от нормального. Было принято решение использовать минимально возможную величину толщины  $h$ , которая определяется номинальной толщиной ОК и длиной импульса первого донного сигнала.

Кроме того, необходимо учитывать, что при выполнении толщинометрии на конусном переходе вносится дополнительная погрешность вследствие изменения диаметра с большего на меньший (покачивание призмы на ОК), а также уменьшается ширина полосы измерений.

Для программного обеспечения (ПО) АВГУР «Анализ данных» был разработан плагин для работы с данными толщинометрии, включающий в себя следующие функции и возможности:

- построение карты толщины по данным толщинометрии;
- просмотр карты толщины по координатам X-Y и по срезу X/Y;
- значение толщины в каждой точке с формированием таблицы значений;
- возможность изменения сетки с соответствующим изменением количества столбцов/строк таблицы со значением толщины;
- поиск минимального значения толщины с фиксацией координат;
- возможность выдачи заключения;

- возможность применения фильтрации (медианная, сглаживающая);
- возможность объединения двух или нескольких файлов данных в один и просмотр общей карты толщины;
- представление карты толщины не зависит от метода сбора данных толщинометрии.

Пример обработки данных толщинометрии изготовленного для Ленинградской АЭС образца LNPP (рис. 5) представлен на рис. 6. Буквы L, N, P и R выполнены толщинами 2, 3, 4 и 5 мм соответственно. Остаточная толщина металла над буквами равна 8, 7, 6 и 5 мм соответственно.

**Построение профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с применением AP по схеме TOFD**

ОК являются сварные соединения трубопроводов с наружными диаметрами  $\varnothing 159-426$  мм. Диапазон контролируемых толщин стенок трубопроводов составляет от 2 мм до 60 мм.

Измерения проводятся с использованием технологий ультразвуковых фазированных AP ультразвуковым методом времяпролетной дифракции (TOFD) с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств.

При контроле применяются преобразователи с AP и сменными призмами для наклонного ввода продольной волны и обеспечения при подключении к дефектоскопу режима электронного сканирования (рис. 7). Одновременно проводятся измерения толщины в околошовной зоне с применением тех же AP, работающих в режиме электронного

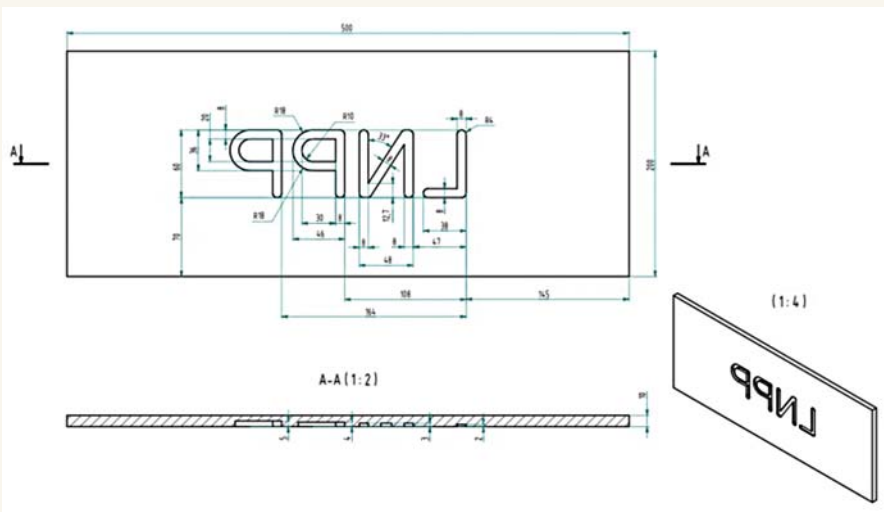


Рис. 5. Образец LNPP. Чертёж

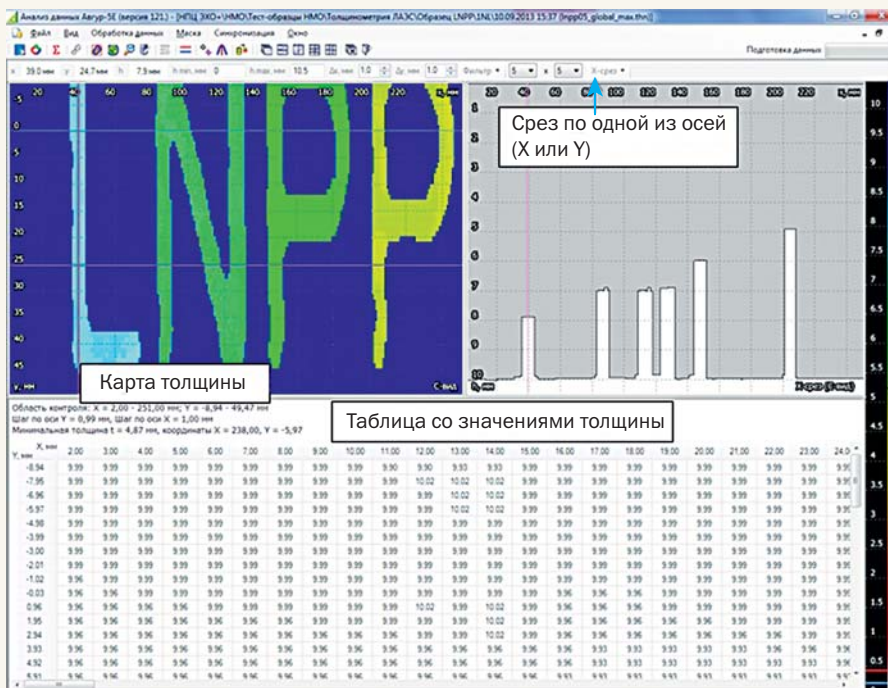


Рис. 6. Интерфейс ПО АВГУР «Анализ данных» для анализа карты толщины

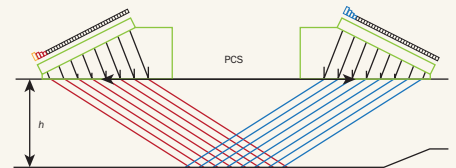


Рис. 7. Принцип измерения толщины по схеме TOFD с AP и электронным сканированием

сканирования с углом ввода  $0^\circ$ , по времени прихода донного сигнала (рис. 8). Таким образом, обеспечивается широкая полоса измерения толщины.

Формула вычисления толщины  $h$  при измерении по методу TOFD, согласно стандарту ASTM E 2373-09 [3] имеет вид:

$$h = [(C/2)^2 (t - t_0)^2 - (PCS/2)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $t$  — время пролета для донного сигнала, мкс;  $t_0$  — калибровочный па-

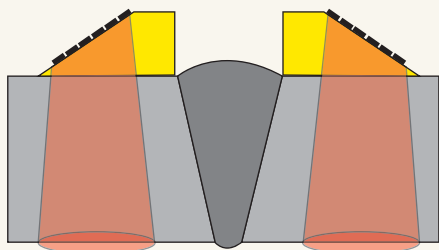


Рис. 8. Принцип измерения толщины в околошовной зоне

раметр, мкс; PCS — расстояние между точками ввода, мм;  $C$  — скорость звука продольной ультразвуковой волны в ОК, мм/мкс.

Калибровочный параметр  $t_0$  предварительно определяется по настроечному образцу и вычисляется по формуле  $t_0 = t_{н0} - 2 [(PCS/2)^2 + H^2]^{1/2} / C$ , где  $t_{н0}$  — время пролета для донного сигнала настроечного образца, мкс;  $H$  — толщина настроечного образца, мм.

Для перемещения АР используется однокоординатное сканирующее устройство с набором треков под диаметры 159, 219, 273, 325, 377 и 426 мм, разработанные ООО «НПЦ «ЭХО+» (рис. 9).

Обоснование параметров схемы измерения толщины проводилось в программной среде CIVA 10.1 с применением ультразвукового модуля.

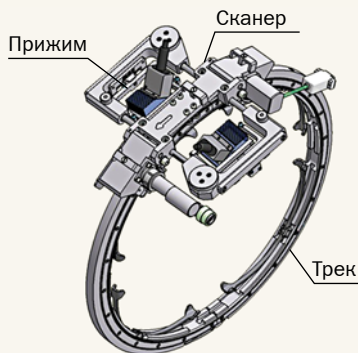


Рис. 9. Сканер СК-ТД.160–426. ДП-1 с треком  $\varnothing$  325 мм

Для проведения толщинометрии сварных соединений трубопроводов с толщиной стенки до 25 мм целесообразно применять АР с частотой 5 МГц, с 32-мя элементами с шагом 0,8–1 мм. Такие решетки обеспечивают оптимальное соотношение ширины контролируемой зоны и габаритов призмы, в том числе контактной площадки. Для эффективного ввода ультразвука под большими углами следует использовать угол наклона призмы, обеспечивающий угол ввода продольной волны около 70°. Стрела преобразователя при этом должна быть минимизирована.

Выбраны четыре активных элемента, что обеспечивает размер пьезоэлемента в соответствии со стандартом ASTM E 2373.

Для того чтобы на фоне донного сигнала выявлять локальные утонения, необходимо установить конкретное положение строба, в котором измеряется время пролета сигнала. Если по амплитуде строб установить на низком уровне, то это приведет:

- к возможному попаданию помехи в строб и к возникновению ошибки при измерении толщины;
- к завышению протяженности утонения за счет широкой диаграммы направленности при измерениях по методу TOFD.

Следовательно, установка строба на низкий уровень по амплитуде приведет к занижению чувствительности к вы-

явлению локальных утонений, а также к увеличению погрешности измерения ширины локальных утонений. В то же время чем ниже уровень строба, тем шире полоса измерения толщины.

Для проверки минимально реализуемой чувствительности и подбора параметров строба смоделирован объект толщиной 25 мм с плоскостными отражателями на глубине 20 мм диаметрами 1, 3 и 6 мм. Расстояние между передними гранями по-прежнему 40 мм.

Отражающая способность плоскостного отражателя  $\varnothing$  3 мм на 23 дБ меньше, чем амплитуда донного сигнала (рис. 10). Отражение от плоскостного отражателя  $\varnothing$  6 мм на 10–14 дБ меньше, чем донный сигнал, толщина в этой точке измеряется как 20,8 мм (рис. 11).

Таким образом, если установить уровень строба на 10 дБ ниже максимума

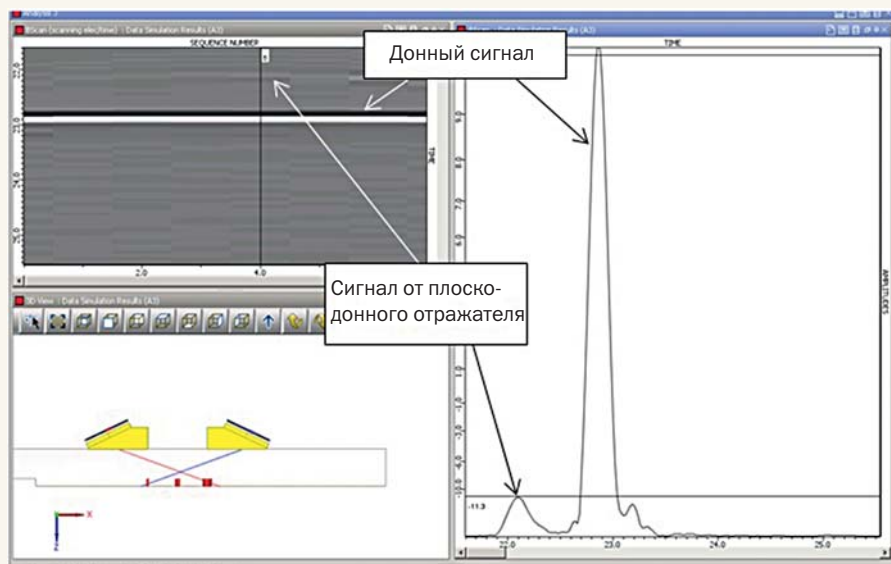


Рис. 10. Отражение от плоскостного отражателя  $\varnothing$  3 мм

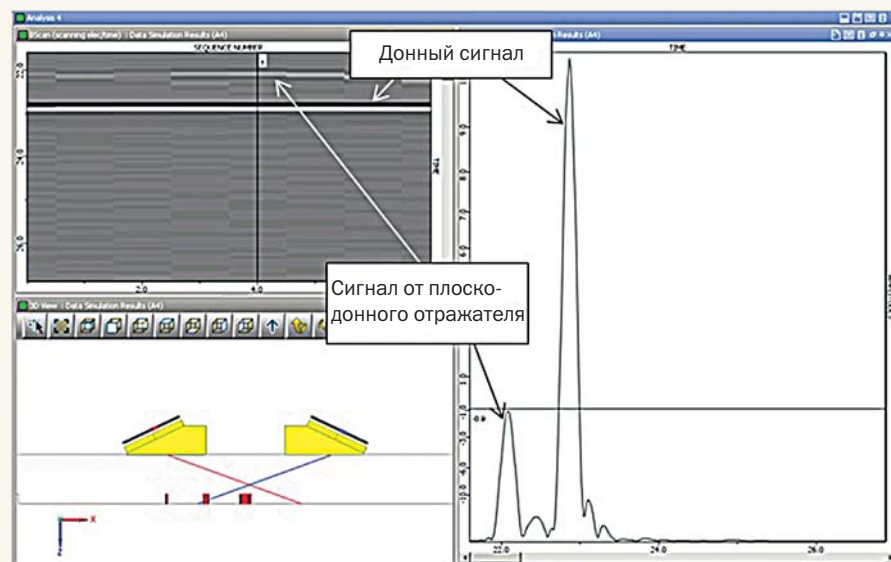


Рис. 11. Отражение от плоскостного отражателя  $\varnothing$  6 мм.

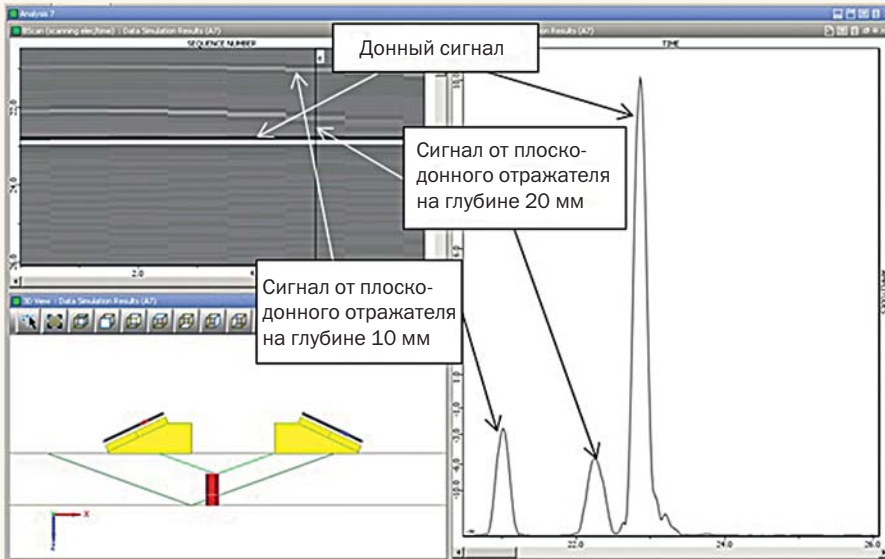


Рис. 12. Отражение от плоскодонного отражателя  $\varnothing$  6 мм на глубине 10 и 20 мм. Несимметричное расположение антенных решеток

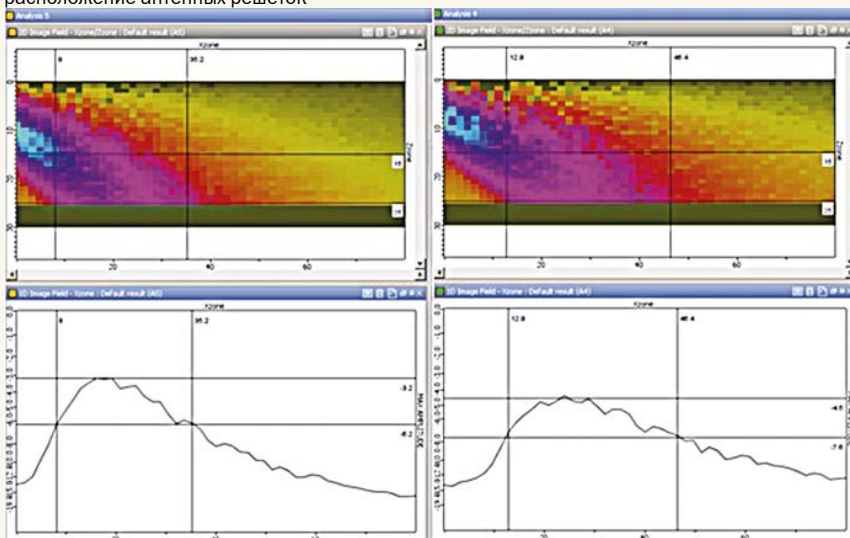


Рис. 14. Расчет поля излучения при использовании 4 элементов (слева угол  $60^\circ$ , справа —  $70^\circ$ )

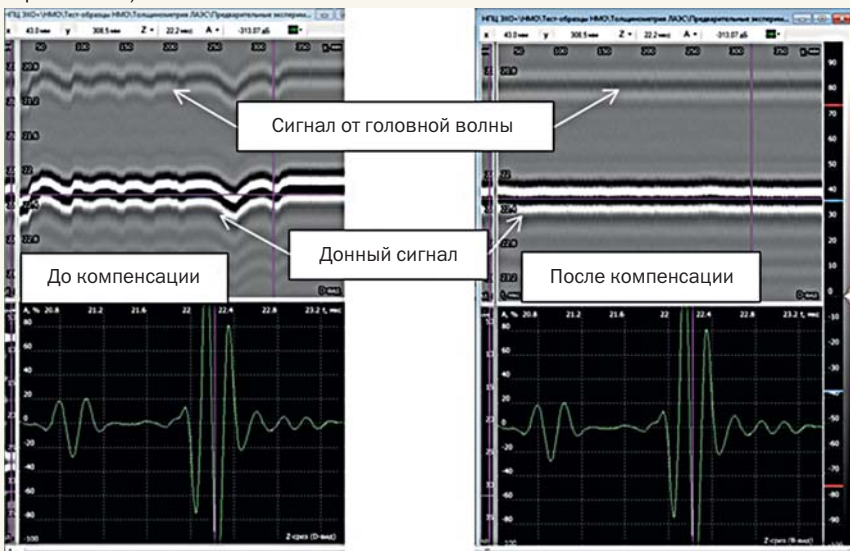


Рис. 15. Компенсация времени пробега головной волны для данных толщинометрии. Применяется до построения карты толщины

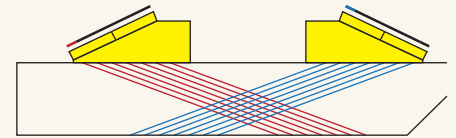


Рис. 13. Толщина 25 мм, пересечение лучей на глубине 15 мм

донного сигнала, то фиксироваться будет локальное утонение, эквивалентное  $\varnothing$  6 мм, причем его протяженность будет фактически точечной.

Моделирование двух плоскодонных отражателей  $\varnothing$  6 мм, один на глубине 10 мм, другой — на глубине 20 мм при несимметричном расположении АР (рис. 12) показало, что при установке строба на 12 дБ ниже, чем донный сигнал:

- глубина отражателя на глубине 10 мм определяется с погрешностью 1,9 мм;
  - глубина отражателя на глубине 20 мм определяется с погрешностью 0,3 мм.
- Если строб установлен на 20 дБ ниже донного сигнала, то:

- глубина отражателя на глубине 10 мм определяется с погрешностью 0,8 мм;
- глубина отражателя на глубине 20 мм определяется с погрешностью 0,3 мм.

При симметричном расположении вне зависимости от уровня строба:

- глубина отражателя на глубине 10 мм определяется с погрешностью 0,6 мм;
- глубина отражателя на глубине 20 мм определяется с погрешностью 0,8 мм.

Оптимальным положением строба признано такое положение, при котором фиксируется сигнал от вертикального плоскодонного отверстия диаметром 6 мм. Однако, поскольку амплитуда эхо-сигнала от отражателя будет зависеть от его положения относительно центра симметрии, положение строба необходимо уточнить.

Были проведены расчеты для обоснования ширины зоны захвата, в которой надежно выявляется утонение. Моделировался объект толщиной 25 мм, плоскодонный отражатель  $\varnothing$  6 мм на глубине 20 мм. В дополнение к электронному сканированию выполнялось механическое сканирование, когда плоскодонный отражатель располагался в диапазоне координат от 0 мм (между передними гранями) до 50 мм. Зависимость ширины зоны захвата от уровня установки строба:

- если строб устанавливается на уровне - 12 дБ, то ширина зоны захвата составляет 30 мм;
- если строб устанавливается на уровне - 20 дБ, то ширина зоны захвата составляет 50 мм.

Проверка также была выполнена на ступеньке глубиной 20 мм. Для такого большого отражателя ширина зоны захвата также составляет:

- при уровне строба – 12 дБ — 30 мм;
- при уровне строба – 20 дБ — 50 мм.

Оптимальным признано положение строба на уровне — 20 дБ относительно донного сигнала, если шумы не достигают данного уровня. В противном случае уровень необходимо изменить до 12–15 дБ.

Было исследовано влияние глубины пересечения лучей. Предположительно погрешность измерения толщины при утонении уменьшится, если лучи будут пересекаться не на донной поверхности, а выше. При угле  $70^\circ$  пересечение на глубине 15 мм (рис. 13), а при угле  $60^\circ$  пересечение на дне.

На рис. 14 показан расчет поля для 4 элементов, угол ввода  $60^\circ$  и  $70^\circ$ . Отличие не существенно. Ширина поля

на глубине 25 мм по уровню — 3 дБ составляет соответственно 27 и 32 мм.

Результаты моделирования показали, что угол ввода не влияет на погрешность измерения, поэтому вопрос с точкой пересечения лучей в данном случае не столь принципиален. Выбор должен делаться также с учетом возникновения и влияния головной волны.

Сигналы головной волны, с одной стороны, увеличивают мертвую зону, пересекаясь с донным сигналом при уменьшении толщины ниже определенного предела. Однако результаты экспериментов показали, что время прихода головной волны всегда меньше, чем время, при котором формула (1), по которой вычисляется толщина, перестает действовать и показывает 0 мм. Таким образом, как таковое влияние головной волны на результаты измерения толщины не существенно. С другой стороны, по времени прихода сигнала головной волны может выполняться компенсация изменения расстояния между передними гранями призм и изменение толщины слоя контактной жидкости. ПО «Анализ данных» поддерживает данную функцию (рис. 15).

### Измерения на испытательных образцах

Для прямо-сдаточных испытаний ЛАЭС был изготовлен образец  $\varnothing 325$  мм с выборками, ориентированными в продольном и поперечном направлении, глубинами от 3 до 9 мм (рис. 16).

Пример карты толщины при толщинометрии основного металла участка трубопровода представлен на рис. 17. Погрешность измерения составила не более 0,2 мм.

Пример карты толщины при толщинометрии участка трубопровода по схеме TOFD приведен на рис. 18. Погрешность измерения составила не более 1,0 мм.

### Закключение

Разработанные методы толщинометрии позволяют своевременно обнаружить локальные области коррозии и эрозии, пропущенные при применении методов выборочной толщинометрии, а также для определения точных пространственных параметров локальных областей измерения толщины.

Одним из перспективных направлений развития методов толщинометрии является внедрение метода цифровой фокусировки антенны [4] для контроля профиля донной поверхности, в том числе конусных проточек и зоны под валиком сварного шва.

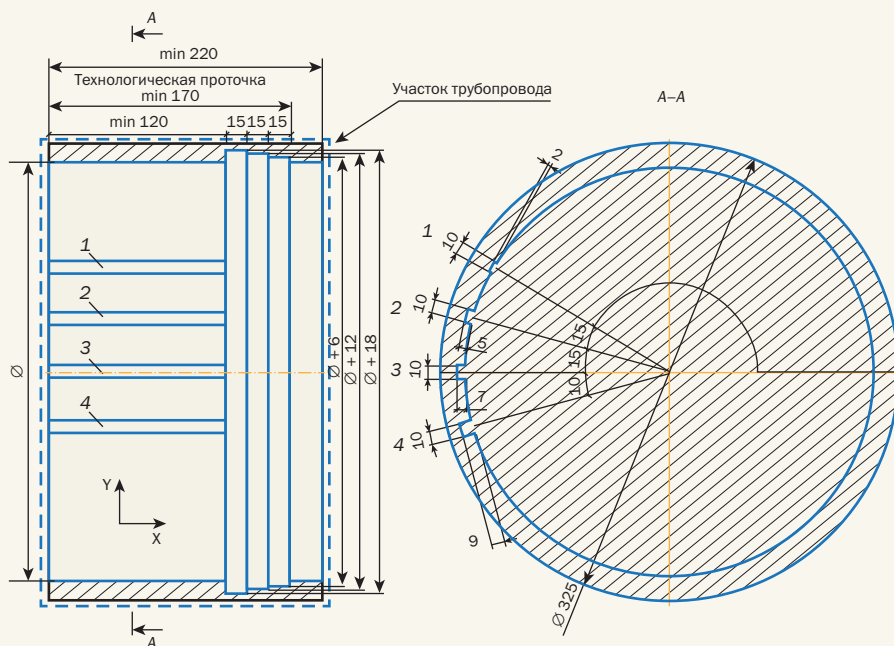


Рис. 16. Испытательный образец для прямо-сдаточных испытаний на ЛАЭС

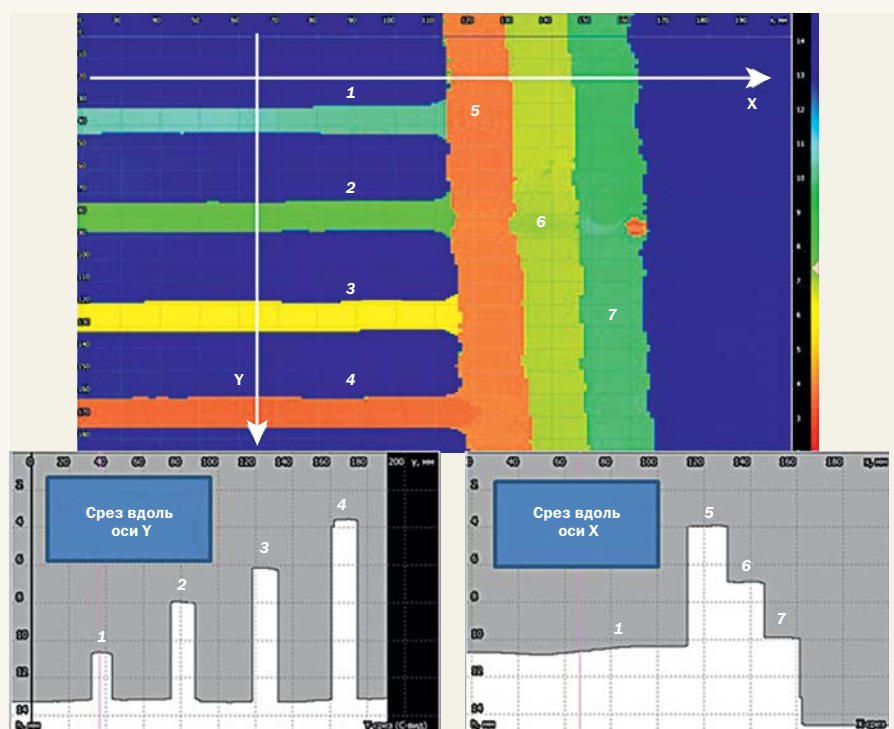


Рис. 17. Пример карты толщины при толщинометрии основного металла

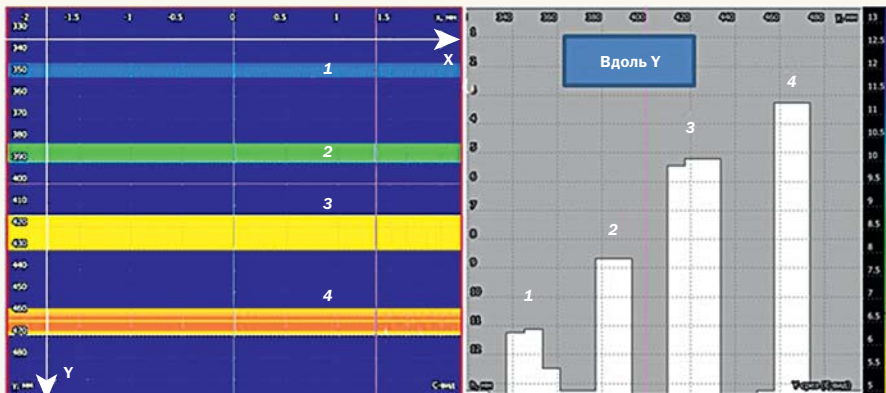


Рис. 18. Пример карты толщины при толщинометрии СС по схеме TOFD

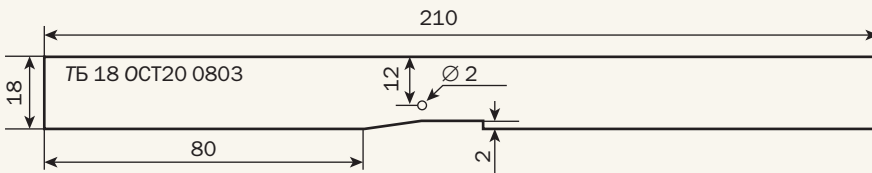


Рис. 20. ОК с неровной донной поверхностью

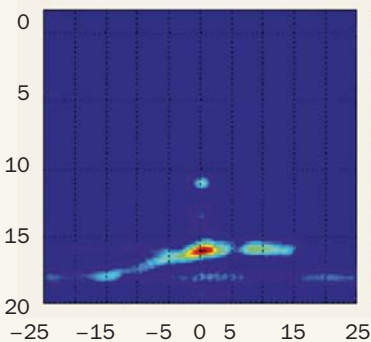


Рис. 21. Изображение профиля дна

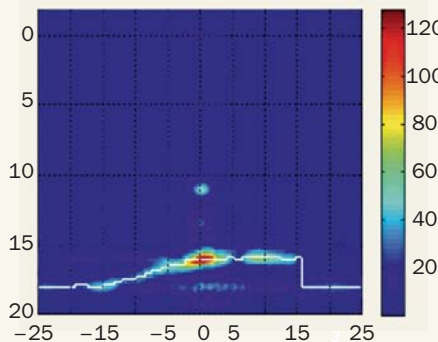


Рис. 22. Изображение профиля дна с примененным алгоритмом поиска дна

Применяют две АР: одну в качестве излучателя (каждым элементом АР независимо и последовательно) эхо-импульсов, а другую в качестве приёмника (всеми элементами одновременно), как показано на рис. 19. В описываемом способе используют 5 акустических схем:

Волна излучения	Волна приемная, отраженная от дна ОК	Схема приема
поперечная	поперечная	раздельная
поперечная	продольная	раздельная
продольная	поперечная	раздельная
продольная	продольная	совмещенная (с N стороны)
продольная	продольная	совмещенная (с P стороны)

Получив ультразвуковые импульсы при использовании всех пяти схем и восстановив пять изображений, при сложении всех восстановленных изо-

бражений получим результирующее изображение профиля донной поверхности.

Пример применения способа на ОК толщиной 18 мм с неровным дном приведен на рис. 20. Результирующее изображение профиля дна приведено на рис. 21. Результат применения алгоритма поиска дна по критерию превышения амплитуды изображения заданного порога представлен на рис. 22. Среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренного профиля донной поверхности от фактического составило 0,18 мм. Если исключить выброс, связанный с наличием резкого перехода (ступеньки), то СКО равно 0,04 мм.

Таким образом, предлагаемый способ может найти широкое применение в ультразвуковой дефектоскопии различных металлоконструкций с неровными поверхностями и одностороннем доступе. Например, для контроля профиля донной поверхности сварных соединений трубопроводов с наличием валика усиления. Способ позволяет обнаружи-

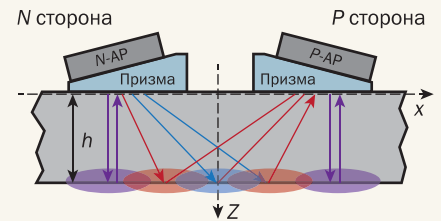


Рис. 19. Применение ЦФА для толщинометрии по схеме TOFD. Фиолетовый цвет — продольные волны по совмещенной схеме, красный цвет — продольные волны по раздельной схеме, фиолетовый цвет — поперечные волны по раздельной схеме

вать вмятины, выемки, коррозию, утонения, провисания, утяжины, смещение кромок и др. с высокой достоверностью и точностью измерения их геометрических параметров.

**Литература**

1. Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3, of the Kansai Electric Power Co., Inc. (Final Report). — The Nuclear and Industrial Safety Agency. 2005, March 30.
2. ПНАЭГ-7-031-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов. Ультразвуковой контроль. Часть III. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий.
3. ASTM E 2373. Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique.
4. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки. — Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51–75.

**References**

1. Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3, of the Kansai Electric Power Co., Inc. (Final Report). — The Nuclear and Industrial Safety Agency. 2005, March 30.
2. PNAE-G-7-031-91. Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnyykh soedineniy i naplavki oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ultrazvukovoy kontrol. Chast III. Izmerenie tolschiny monometallov, bimetallov i antikorroziornykh pokrytiy [Uniform methods of control of basic materials (semi-finished product), welded joints and cladding of equipment and pipelines of nuclear power plants. Ultrasonic examination. Part III. Thickness measuring of monometal, bimetal and corrosion coating].
3. ASTM E 2373. Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique. ASTM International, Philadelphia, 1995.
4. Bazulin E. G. Sravnenie system dlya ultrazvukovogo nerazrushayuschego kontrolya, ispolzuyuschego antennnye reshenki ili fazirovannyye antennnye reshenki [Ultrasonic systems comparison for phased array and array probes]. Russian J. Nondestructive Testing. 2013, no.7, pp. 51–75.

Статья получена 16 июня 2014 г., в окончательной редакции — 24 ноября