

ЦИФРОВАЯ ФОКУСИРОВКА АПЕРТУРЫ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ВСЕМИ ЭЛЕМЕНТАМИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В ОДНОМ ЦИКЛЕ ИЗЛУЧЕНИЕ—ПРИЕМ

© 2022 г. В.Г. Шевалдыкин^{1,*}, А.А. Самокрутов^{1,2}

¹ООО «Акустические Контрольные Системы», Россия 142712 Московская область, Ленинский район,
пос. Горки Ленинские, промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

* E-mail: shev@acsys.ru

Поступила в редакцию 01.01.2022; после доработки 26.01.2022

Принята к публикации 26.01.2022

Изложен физический смысл метода визуализации путем нескольких посылок в объект зондирующих ультразвуковых волн с плоским фронтом в сравнении с методом цифровой фокусировки апертуры. Представлены результаты экспериментальных исследований по реконструкции томограмм этими методами визуализации из ультразвуковых данных, записанных при контроле металлических образцов с отражателями. Показано, что метод плоских волн позволяет получать изображения не только когда межэлементные задержки зондирующих импульсов обеспечивают генерацию реальных волн с плоским фронтом, но и при задержках, дающих виртуальный фронт волн, которые физически не существуют. Когерентное суммирование изображений, полученных при нескольких углах наклона волнового фронта, формирует томограмму, не значительно уступающую по качеству томограмме, реконструированной методом цифровой фокусировки апертуры. Но времени на сбор ультразвуковых данных требуется в несколько раз меньше, что важно для практических применений, в частности, при скоростном автоматизированном контроле.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, антенная решетка, томограмма, эхосигнал, цифровая фокусировка апертуры (ЦФА), плосковолновое изображение (ПВИ).

DOI: 10.31857/S0130308222020026

ВВЕДЕНИЕ

Для визуализации внутренней структуры металлических объектов, в частности сварных соединений, с целью поиска и оценки различных нарушений сплошности металла широко используют ультразвуковые (УЗ) дефектоскопы с антенными решетками (АР). Принципы действия этих приборов основаны на импульсном эхометод. Изображения в них формируются либо электронным управлением диаграммой направленности решетки (метод фазированной антенной решетки (ФАР)), либо вычислительным путем из массива эхосигналов, принятых элементами решетки от последовательного зондирования ими объекта контроля (ОК) [1]. Этот второй метод назван цифровой фокусировкой апертуры (ЦФА) [1, 2]. В зарубежной литературе его называют Total Focusing Method (TFM) [3].

Метод ЦФА по всем основным характеристикам, важным для УЗ контроля, превосходит метод ФАР [4]. Высокая чувствительность ЦФА к малоразмерным отражателям сочетается с наибольшей разрешающей способностью по всему полю изображения, которая ограничена только параметрами используемой АР. Авторы работы [5] метод TFM оценивают как эталонный. Однако высокие характеристики метода ЦФА достигаются ценой определенных затрат времени на излучение и прием УЗ сигналов из-за относительно небольшой скорости ультразвука в металлах. Это время при автоматизированном контроле определяет предел скорости механического сканирования ОК. При контроле объектов электромагнитно-акустической АР с импульсным подмагничиванием время активности решетки напрямую влияет на энергию, потребляемую системой подмагничивания и вызывающую ее нагрев. Поэтому актуален поиск путей уменьшения этого времени.

В медицинской аппаратуре УЗ диагностики сравнительно недавно стали применять метод плосковолнового изображения (ПВИ) (Plane Wave Imaging (PWI)) [6—9]. Суть его в зондировании ОК сразу всеми элементами АР с параллельным приемом эхосигналов в многоканальном приемнике. Зондирование проводят несколько раз с разными межэлементными задержками зондирующих импульсов для излучения волн с плоскими фронтами под разными углами наклона к поверхности ОК. Результирующее изображение получают когерентным суммированием отдельных изображений от разных «плоских» волн.

При реконструкции отдельных изображений для расчета траекторий распространения УЗ сигналов полагают, что визуализируемая область пациента облучается плоским волновым фронтом АР, а эхосигналы от отражателей малых волновых размеров возвращаются к элементам АР в виде волн со сферическим фронтом. Такой же принцип расчета времен пролета УЗ сигналов в ОК используют и авторы работ [5, 10—12], адаптируя метод РWІ к задачам неразрушающего контроля. Времена распространения УЗ сигналов на пути от АР до каждой визуализируемой точки ОК приравнивают к времени распространения плоского волнового фронта от апертуры АР до этой точки, т.е. до каждой такой точки путь УЗ сигнала — нормаль к фронту волны. Этот принцип основан на представлении, что волна с плоским фронтом — единственное волновое возмущение, распространяющееся в среде. Для дальней зоны АР это было бы справедливо, но не для ближней зоны.

При таком упрощении расчетов траекторий игнорируются все зондирующие сигналы, которые распространяются к точкам визуализации не по нормальям к волновому фронту, хотя сигналы реально существуют. Как результат, в каждую точку изображения вкладывается намного меньше информации о неоднородностях среды, чем при полном расчете времен по всем путям распространения зондирующих сигналов от каждого элемента АР к отражателям. Кроме того, протяженность плоского фронта зависит от угла его наклона относительно апертуры АР. Чем больше угол наклона, тем меньшая область среды озвучивается плоским фронтом, для которой упрощенный расчет оправдан. Например, при угле фронта (направлении его распространения) 60° протяженность его плоской части уменьшается до половины апертуры АР. Это ограничение отмечено также в работе [12].

Главная цель применения метода РWІ — уменьшение времени сбора УЗ данных при сохранении высокого качества изображений. В работе [5] показано, что качество изображений почти не уступает качеству метода TFM при количестве зондирований «плоскими» волнами порядка 20—50, что в несколько раз меньше количества элементов 128-элементной АР. Поскольку при TFM количество зондирований, как минимум, равно количеству элементов АР, то использование РWІ позволяет ускорить работу визуализирующей аппаратуры.

Однако по результатам работы [5] трудно сделать достоверный вывод о том, что качество суммарного изображения, полученного методом РWІ, не уступает методу TFM. В ней экспериментально получали изображения методами TFM и РWІ на стальном образце с несколькими боковыми отверстиями, расположенными близко друг к другу. Из-за переотражений УЗ волн между отверстиями и от волн обегания-соскальзывания на изображениях присутствует множество артефактов, маскирующих разницу в качестве изображений от применения разных методов визуализации. Также не удачное сравнение изображений, построенных этими методами, проведено в статье [12], где почти все изображения получены на образцах из плексигласа, а на единственном стальном образце изображения реконструированы по данным от 68 положений АР на поверхности образца. В результате синтеза столь большой апертуры разница в качестве изображений почти не заметна.

Цель данной работы — сравнить изображения, реконструированные методом ЦФА, с изображениями метода ПВИ как с отдельными от однократного зондирования ОК, так и с суммой изображений от нескольких посылок в ОК «плоских» волн. Расчет траекторий УЗ сигналов для обоих методов визуализации производится здесь одинаково: от каждого излучающего элемента АР к визуализируемой точке среды и обратно к каждому приемному элементу решетки. Следовательно, для метода ПВИ понятие волнового фронта не используется. Метод ПВИ в данной работе исследуется в широком диапазоне межэлементных задержек, от нулевой (синфазное излучение) до величин, превышающих время пролета УЗ сигнала вдоль всей апертуры АР. При больших задержках никаких плоских волн образоваться не может. Термин «волновой фронт» используется в статье лишь для простоты изложения.

Качество изображений от методов ЦФА и ПВИ экспериментально исследуется на стальных образцах с одним боковым цилиндрическим отверстием (БЦО). Все изображения реконструируются при одном положении АР на поверхности ОК, т.е. без сканирования, чтобы наиболее отчетливо выделить различия в качестве изображений и максимально уменьшить причины их искажений, не связанные с методами визуализации.

ОТЛИЧИЯ ПРОЦЕССОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ ПООЧЕРЕДНОМ И ОДНОВРЕМЕННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ОБЪЕКТА ЭЛЕМЕНТАМИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Особенности ультразвуковых данных и алгоритмов реконструкции

Метод ЦФА основан на поочередном зондировании ОК каждым элементом АР и параллельном приеме сигналов всеми элементами. В итоге получается набор независимых реализаций сигналов (А-сканов) от каждой пары элементов АР излучатель—приемник. Если в решетке N элементов, то в этом наборе $N(N-1)/2$ А-сканов вида $A_{ij}(t)$, где i, j — номера излучающего и приемного элементов АР соответственно, столько же А-сканов $A_{ji}(t)$ и N А-сканов от элементов в совмещенном режиме. Всего N^2 А-сканов [1, 2].

При реконструкции изображения в каждую его точку суммируются отрезки А-сканов, длительностью, равной длительности эхоимпульса, и временем задержки распространения УЗ сигнала между АР и визуализируемой точкой ОК. Выбираются отрезки из всех А-сканов со всеми временами задержки от ближайшей до самой дальней точке ОК.

Согласно принципу взаимности для каждой пары конкретных значений i и j $A_{ij}(t) = A_{ji}(t)$. Поэтому половину из них ($A_{ij}(t)$, или $A_{ji}(t)$) можно либо исключить из процесса реконструкции без потери информации, либо усреднить каждую пару, чтобы суммирование отрезков всех А-сканов происходило с одинаковым весом.

При зондировании ОК всеми элементами АР в одном цикле излучение — прием (при ПВИ) количество А-сканов в наборе равно N . В них присутствует вся та же информация об отражателях объекта, что и при поочередном зондировании. Каждый зондирующий сигнал от каждого элемента АР порождает эхосигналы, которые принимаются всеми элементами решетки. Поэтому в каждом А-скане аддитивно присутствуют импульсы эхосигналов от всех зондирующих сигналов, т.е. происходит их смешение.

Изображение реконструируется так же, как и при поочередном зондировании. Но из-за смешения эхосигналов из каждого А-скана необходимо выбирать отрезки с временами задержки для всех траекторий T распространения УЗ сигналов от всех излучателей к приемнику, от которого получен А-скан. В результате в изображении кроме полезных эхосигналов (принимаемых при поочередном зондировании) неизбежно отображаются «лишние» эхосигналы, вызывающие нефокусированные фантомные образы.

В наборе УЗ данных для ПВИ в каждом из N А-сканов присутствуют импульсы, равные которым есть в других А-сканах. Например, в А-скане $Ai(t)$ есть импульс s_{ji} , а в А-скане $Aj(t)$ — равный ему импульс s_{ij} . Но в А-скане $Ai(t)$ есть также импульс $s_{k,i}$, вызванный эхосигналом от излучателя с номером k . А в А-скане $Ak(t)$ — равный ему импульс $s_{i,k}$. И еще в $Ai(t)$ есть импульсы от всех остальных излучателей решетки. И также в А-сканах от других приемных элементов. Поэтому из каждой пары взаимно обратимых траекторий T_{ij} и T_{ji} согласно принципу взаимности нужно использовать только одну.

Независимо от способа зондирования ОК, зондирующие сигналы и эхосигналы от отражателей распространяются в среде одинаково по одним и тем же траекториям. Например, от элемента АР с номером i к некоторому отражателю и обратно к элементу с номером j УЗ сигнал распространяется по траектории T_{ij} одинаково и независимо от других УЗ сигналов и от межэлементных задержек. Независимость обеспечивается линейностью среды и принципом суперпозиции. Поэтому в любом случае времена задержки эхосигналов рассчитываются одинаково, исходя только из длины траектории и скорости ультразвука в среде, без применения понятия «плоского волнового фронта».

Сравнение процессов визуализации на простейшей модели

Пусть АР состоит из двух элементов, а ОК в виде полупространства содержит один ненаправленный отражатель, произвольно расположенный относительно АР. На рис. 1 представлена схема траекторий распространения УЗ сигналов в ОК и вид наборов А-сканов, принятых АР при поочередном и одновременном зондировании.

Очевидно, что при поочередном зондировании (рис. 1б) каждый А-скан содержит один импульс с временем задержки, пропорциональным длине траектории УЗ сигнала от излучателя к отражателю и обратно к приемнику. Задержки импульсов в А-сканах $A_{2,1}(t)$ и $A_{1,2}(t)$ равны, т.к. соответствующие им УЗ сигналы прошли по одной и той же траектории, но в противоположных направлениях.

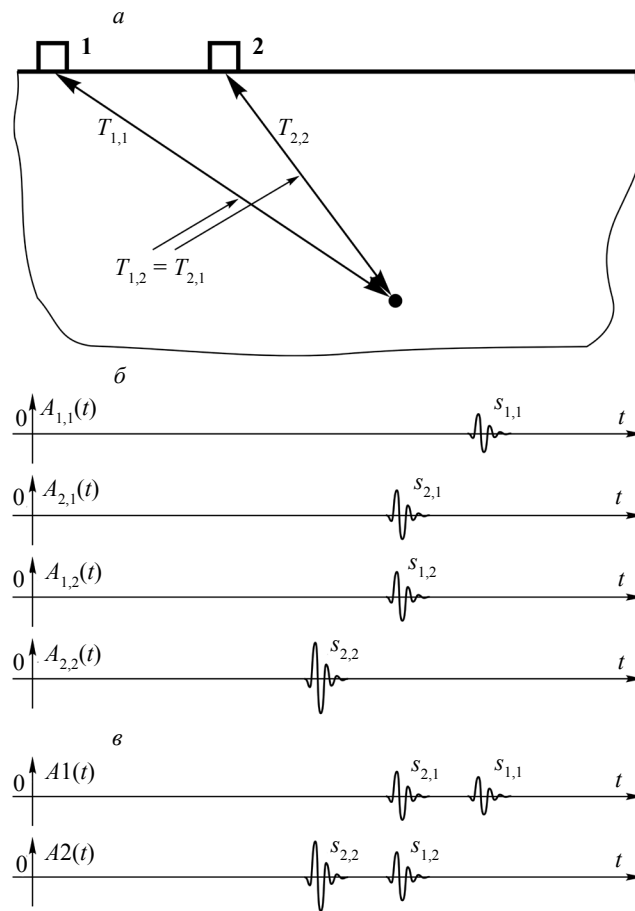


Рис. 1. Траектории распространения ультразвуковых сигналов от элементов антенной решетки к отражателю и обратно (а), осциллограммы А-сканов, принятых элементами решетки при поочередном зондировании (б) и при одновременном зондировании (в).

При одновременном зондировании (рис. 1в) в каждом А-скане есть два импульса, по одному от каждого элемента, пославшего зондирующий импульс в ОК. Видно, что в этом случае в А-сканах присутствуют все те же импульсы, что и при поочередном зондировании ОК, т.е. вся информация об отражателе присутствует. Но импульсы от каждого излучателя смешаны при приеме. Импульсы на выходе первого приемника (А-скан $A_1(t)$ на рис.1в) принадлежат траекториям $T_{2,1}$, $T_{1,1}$ (слева направо по рис. 1в), импульсы в А-скане $A_2(t)$ — траекториям $T_{2,2}$, $T_{1,2}$.

При поочередном зондировании на изображении (рис. 2а) от каждого А-скана прорисовываются по одной линии, т.к. в каждом А-скане только один импульс. Линии составлены из точек, для которых время задержки равно времени пролета УЗ сигнала по траектории к выбранной точке в ОК. На изображении (см. рис. 2а) только три линии, т.к. А-сканы $A_{2,1}(t)$ и $A_{1,2}(t)$ одинаковы, и от них в изображение попадает один импульс. Линии от импульсов $s_{1,1}$ и $s_{2,2}$ в А-сканах $A_{1,1}(t)$ и $A_{2,2}(t)$ — это части окружностей с центрами в точках с координатами элементов решетки. Линия от импульса $s_{2,1}$ в А-скане $A_{2,1}(t)$ (или от усредненных $A_{2,1}(t)$ и $A_{1,2}(t)$) — часть эллипса с фокусами в точках с координатами элементов. Линии пересекаются в одной точке с координатами расположения отражателя.

При одновременном зондировании изображение состоит из 6 линий (рис. 2б). Происхождение этих линий следующее. При реконструкции изображения сначала из А-скана $A_1(t)$ выбираются отрезки с временами задержки для траекторий УЗ сигналов $T_{2,1}$. В результате на изображении прорисовываются две линии эллиптической формы с фокусами в точках, где расположены элементы: одна проходит через точку с координатами отражателя, поскольку в $A_1(t)$ первый по времени импульс $s_{2,1}$ — УЗ сигнал, реально прошедший по траектории $T_{2,1}$, вторая линия дальше первой, т.к. второй импульс $s_{1,1}$ дальше по времени. Обозначения линий на изображении (см. рис. 2б)

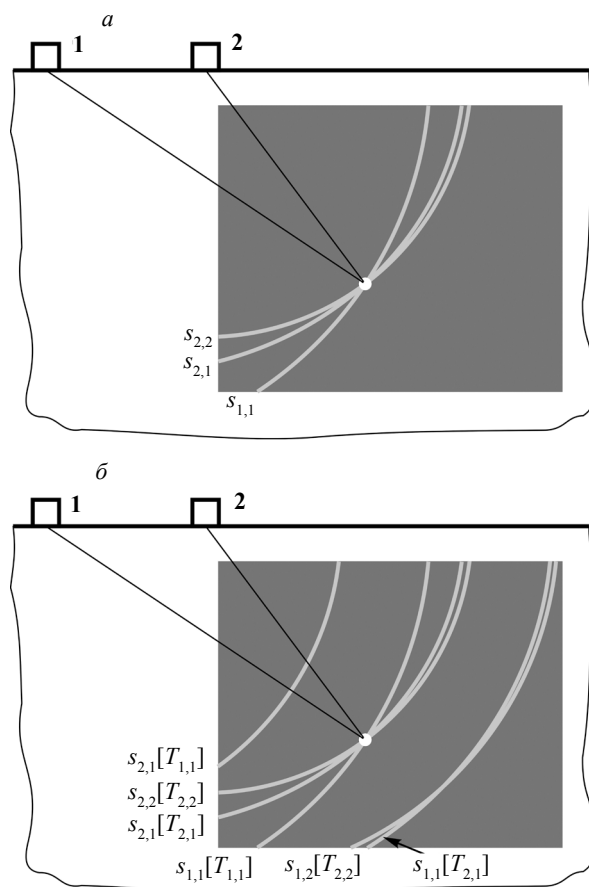


Рис. 2. Изображения с образом одиночного отражателя, реконструированные в результате поочередного зондирования ОК элементами антенной решетки (а) и одновременного зондирования (б).

составлены из обозначения импульса и обозначения траектории в квадратных скобках, по времени задержки которой вычисляются положения всех точек линии на изображении.

Затем аналогично из А-скана $A1(t)$ производятся выборки для траекторий $T_{1,1}$. На изображении прорисовываются тоже две линии — части окружностей с центром в точке первого элемента. Линия от первого по времени импульса в А-скане $A1(t)$ появляется левее точки с координатами отражателя из-за меньшего времени задержки, чем у второго импульса. А второй импульс — результат прохождения УЗ сигнала именно по траектории $T_{1,1}$. Поэтому линия от него проходит через точку с координатами отражателя.

Также производятся выборки отрезков из А-скана $A2(t)$ с временами задержки для траекторий $T_{2,2}$. В результате на изображении появляются еще две линии: одна от импульса $s_{2,2}$, проходящая через точку с координатами отражателя, другая от импульса $s_{1,2}$ правее по изображению. Выборки для траекторий $T_{1,2}$ не производятся, т.к. дополнительной информации об отражателе в изображении не добавляется.

Три линии, пересекающиеся в одной точке, формируют образ отражателя. Они полностью совпадают в обоих изображениях (ср. рис. 2а и 2б). Их расходящиеся вверх и вниз концы — обычные следы от эхосигналов отражателя, которые всегда присутствуют на изображениях приборов с АР. Только при большом количестве элементов АР их множество, но они намного меньше амплитуды образа отражателя и слабо видны. Поскольку в точке пересечения линий отрезки А-сканов суммируются в фазе, то даже на данном изображении от 2-элементной решетки амплитуда образа отражателя выше амплитуды следов примерно в 3 раза. Конечно, в аппаратуре в каждую точку изображения выводится не просто сумма отрезков А-сканов, а протектированный каким-либо способом результат в виде точки, цвет или яркость которой соответствует суммарному уровню сигнала, накопленного в этой точке. Другие три линии на изображении (см. рис. 2б) — неизбежные артефакты, вызванные смещением принятых эхосигналов в А-сканах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оборудование и методика экспериментов

Для экспериментов был взят стандартный образец (по современной терминологии «мера») СО-2, изготовленный из стали 20 по ГОСТ 1050—74. В качестве отражателя в нем использовали БЦО диаметром 6 мм. Для получения изображений с образом этого отражателя на разных глубинах антенную решетку устанавливали на каждую рабочую поверхность образца. В одном случае глубина центра БЦО была равна 15 мм, в другом — 44 мм.

Сбор УЗ данных проводили с помощью линейной 16-элементной АР М9170, рассчитанной на наклонное излучение и прием поперечных УЗ волн со средней частотой спектра 4 МГц. В этой решетке каждый элемент установлен на отдельную микропризму, расположенную в плане с шагом $p = 1,75$ мм. Средняя длина пути ультразвука в призмах 1,6 мм. Эффективный сектор обзора пространства решетки, определяемый диаграммой направленности элементов, составляет от 35 до 85° относительно нормали к рабочей поверхности АР [13].

Схема расположения АР на поверхностях образца СО-2 приведена на рис. 3. Расстояния между центром БЦО и центром апертуры решетки были выбраны так, чтобы координаты образов отверстия по горизонтальной оси X оказались бы равными круглым значениям миллиметров. Направления лучей, проведенных из центра апертуры АР на центры отверстий, отклонены от нормали к поверхности СО-2 на углы 65 и 43° при глубинах отверстий 15 и 44 мм соответственно.

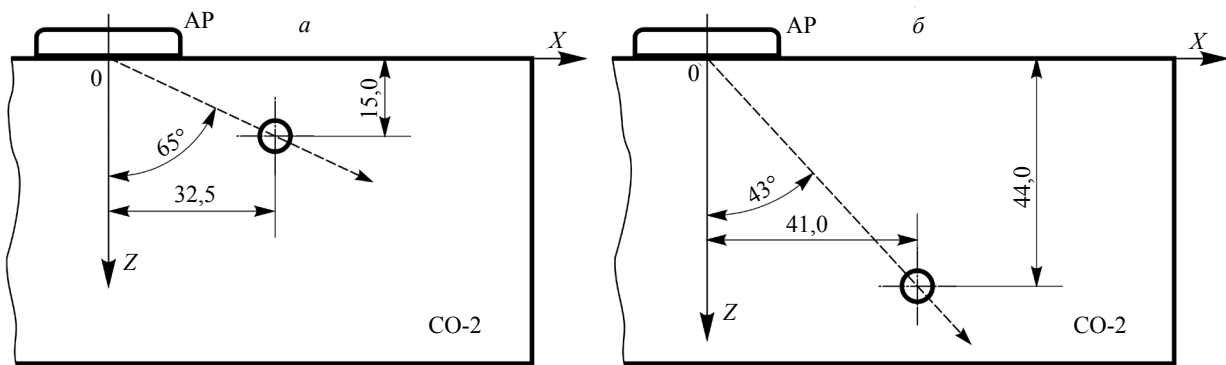


Рис. 3. Схемы взаимного расположения антенной решетки и бокового цилиндрического отверстия.

В обоих положениях АР относительно БЦО были записаны по 256 независимых реализаций эхосигналов от каждой пары элементов решетки излучатель — приемник при неизменных параметрах возбуждения элементов и усилении приемного тракта, т.е. были записаны полные (прямоугольные) матрицы УЗ данных [1, 3, 4, 14]. Из этих данных затем были реконструированы все представленные ниже изображения типа В.

При реконструкции изображений методом ЦФА использовали треугольные матрицы данных (половину реализаций от каждой пары элементов АР и реализации совмещенного режима), поскольку, как указано выше, это дает тот же самый результат, что и от полной матрицы. Это практически подтверждено в работе [14].

При реконструкции изображений методом ПВИ использовали полные матрицы исходных данных. Для создания набора данных для этого метода предварительно суммировали каждые 16 исходных реализаций, записанных от каждого приемного элемента АР, при зондировании ОК всеми 16-ю излучателями решетки. В результате получались 16 суммарных реализаций, полностью совпадающие с теми, которые могли быть получены при одновременном зондировании ОК всеми элементами АР с параллельным приемом сигналов 16-канальным приемником.

Для создания разных углов наклона волнового фронта суммирование исходных реализаций выполняли с введенными одинаковыми задержками между реализациями от соседних излучающих элементов АР. При шаге p АР 1,75 мм и скорости c_s поперечных волн в СО-2 3230 м/с для угла α наклона фронта, например, в 34° (округленно) требуется межэлементная задержка Δt , равная 300 нс,

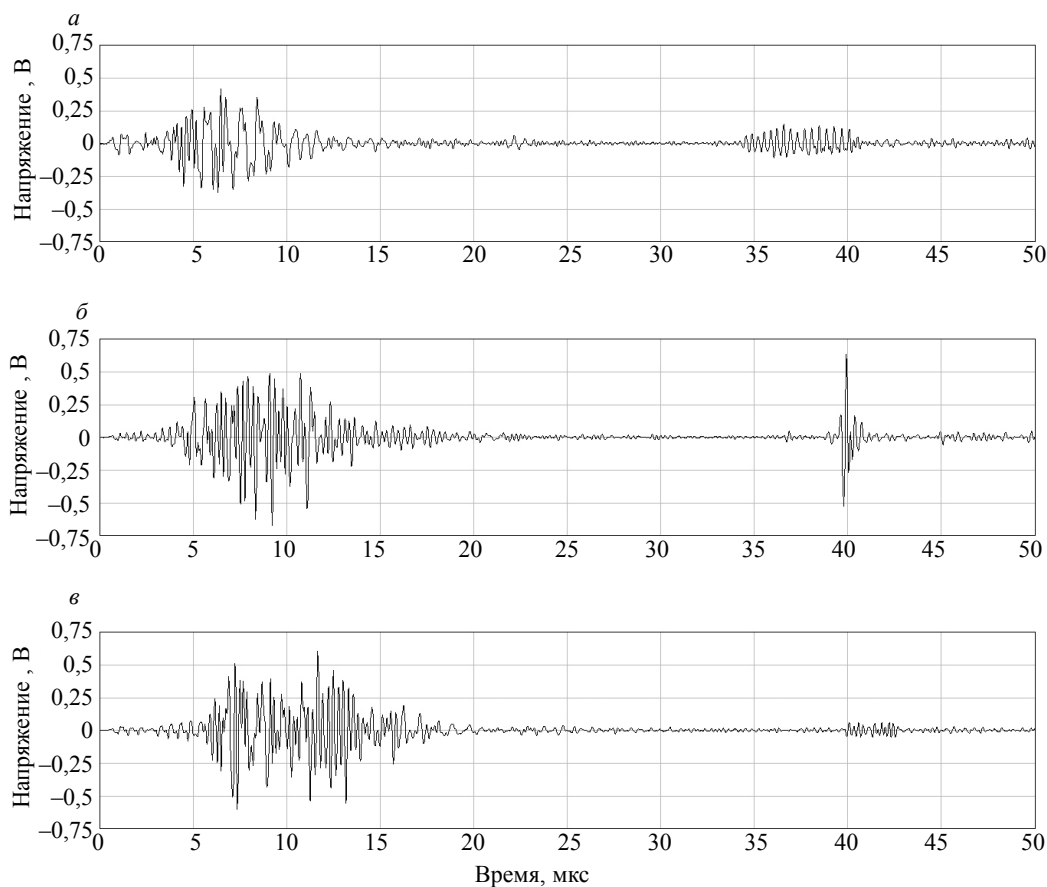


Рис. 4. Осциллограммы суммарных реализаций, принятых элементом № 7 антенной решетки, при зондировании образца всеми элементами с углами наклона волнового фронта 0° (а), 44° (б) и 76° (в).

для угла в 67° — 500 нс. Частота дискретизации исходных реализаций равнялась 40 МГц. Чтобы не использовать лишнее переквантование сигнала, конкретные значения межэлементных задержек выбирали кратными периоду дискретизации, т.е. 25 нс. Задержки вычисляли по следующей формуле:

$$\Delta t = \frac{p \cdot \sin \alpha}{c_s}$$

На рис. 4 для примера приведены суммарные реализации, полученные от приемного элемента № 7 АР при ее расположении на СО-2, показанном на рис. 3б. Если межэлементные задержки равны нулю, то угол наклона волнового фронта тоже равен нулю. Поскольку БЦО смещен по оси x на 41 мм от центра апертуры, то при нулевых задержках все эхосигналы от БЦО образуют пачку импульсов, занимающую интервал времени от 34 до 41 мкс (см. рис. 4а). При угле наклона фронта, равном 44° , направление распространения волны практически совпадает с направлением на отражатель. Поэтому все зондирующие сигналы достигают отражатель почти одновременно и, суммируясь, создают эхосигнал, в несколько раз превышающий амплитуду сигнала от одиночного зондирующего сигнала. При амплитуде импульсов возбуждения элементов АР 50 В и коэффициенте усиления приемного тракта порядка 80 (38 дБ) амплитуда одиночного эхоимпульса от БЦО составляла в среднем 80 — 100 мВ. Как видно из рис. 4б, амплитуда эхоимпульса здесь (момент времени 40 мкс) составляет около 650 мВ. Наклон фронта волны в 76° (см. рис. 4в) привел к тому, что эхосигналы оказались в основном в противофазе. И результирующая пачка импульсов в интервале от 40 до 42,5 мкс получилась с малой амплитудой. Колебания в осциллограммах на рис. 4 в интервале от нуля до 15—20 мкс — это собственные реверберационные шумы АР.

Все изображения реконструировали во временной области без использования методов компенсации ослабления сигналов от дифракционного расхождения УЗ лучей и от затухания ультразвука

в материале ОК. Не использовали также никаких возможностей цифрового расширения диаграмм направленности элементов АР. Все изображения построены из исходных «сырых» сигналов.

Результаты и их обсуждение

Образы отражателей, ненаправленных в плоскости визуализации, таких как БЦО, обычно очень компактные, если отражатели находятся не далее границы ближней зоны АР. В обоих случаях, показанных на рис. 3, БЦО находятся в ближней зоне АР [15]. На рис. 5 представлены томограммы образца СО-2 в зоне БЦО для этих случаев, построенные методом ЦФА. Координаты образов, естественно, не совпадают с координатами центров БЦО, поскольку зондирующие сигналы АР отражаются от цилиндрической поверхности отверстий.

На фиолетовом фоне этих изображений нет следов какого-либо равномерно распределенного шума по всему полю изображений. Таким шумом мог бы быть только структурный шум металла и тепловой шум приемного тракта. Материал образца СО-2 мелкоструктурный, и шум структуры в нем мал. Что касается шума приемника, то его уровень в изображениях как минимум ниже минус 45 дБ относительно амплитуд образов.

Все шумы этих изображений и фантомные образы вызваны собственным реверберационным шумом АР, сигналами нерабочих типов УЗ волн (продольных, головных, рэлеевских и т.д.) и, конечно, остаточными от реконструкции эллиптическими следами эхосигналов, отраженных от БЦО. Эти следы особенно хорошо заметны на рис. 5а в нижнем левом углу изображения. Их максимальный уровень, измеренный в точке $x = 20$, $z = 22$ мм, равен минус 22,3 дБ. Наибольший уровень из всех фантомных образов изображения, рис. 5а, у образа от волн обегания—соскальзывания, рассеянных отражателем. Координаты этого фантома: $x = 37,4$, $z = 15,2$ мм. Его амплитуда равна минус 18,3 дБ.

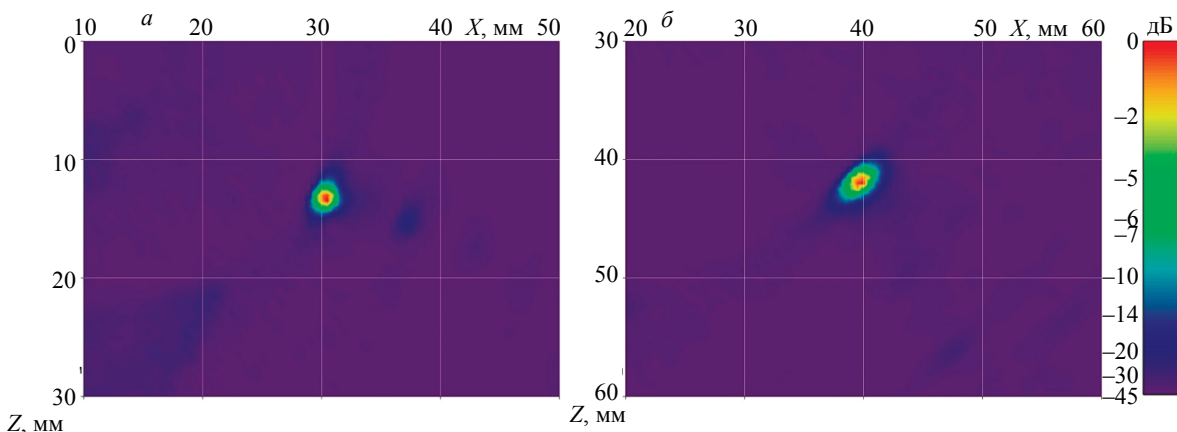


Рис. 5. Томограммы с образами боковых цилиндрических отверстий в СО-2, реконструированные методом ЦФА: а — БЦО на глубине 15 мм; б — 44 мм.

На изображении (рис. 5б) наибольшей амплитудой, равной минус 25,1 дБ, обладает фантом с координатами $x = 47,7$, $z = 56,2$ мм. Он наиболее вероятно образован сигналами поперечной волны, прошедшей по траектории от АР к донной поверхности СО-2, затем после трансформации в продольную волну к БЦО и далее снова поперечной волной в сторону решетки. Эллиптические следы эхосигналов от БЦО здесь не превышают уровень минус 26 дБ на расстоянии более 5 мм от образа отражателя.

Томограммы, реконструированные из реализаций от приемных элементов АР, в которых присутствуют эхосигналы от всех излучающих элементов, т.е. построенные методом ПВИ, рассмотрим сначала по отдельности для разных углов наклона плоского волнового фронта. Конечно, при поочередном зондировании и записи исходных реализаций от каждой пары элементов решетки никаких плоских волн в среде возникнуть не может. Но в силу принципа суперпозиции эффект плоских волн после суммирования исходных реализаций с сигналами от каждого излучающего элемента АР присутствует в полной мере.

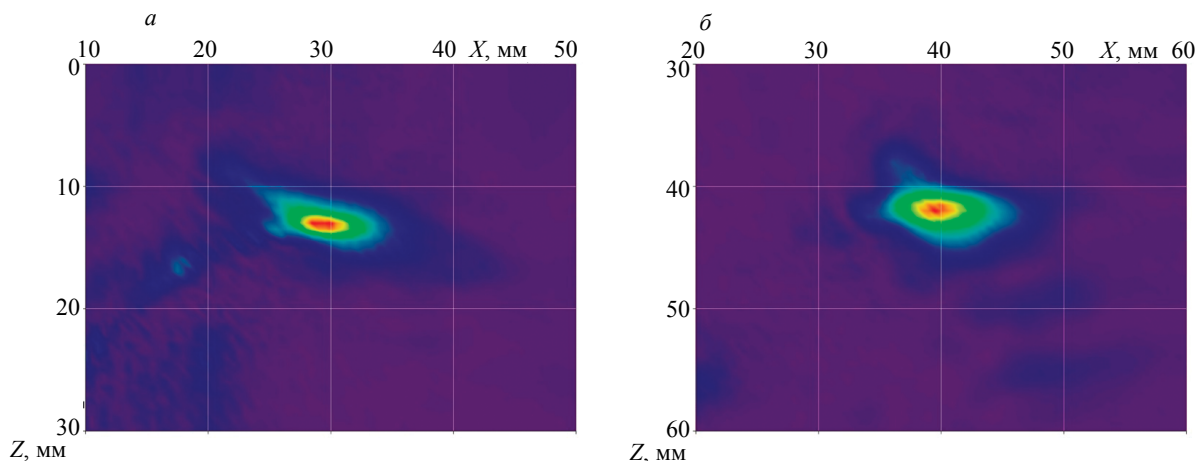


Рис. 6. Томограммы с образами боковых цилиндрических отверстий в СО-2, реконструированные методом ПВИ с межэлементными задержками, равными нулю:
a — на глубине 15 мм; *b* — 44 мм.

На рис. 6 представлены томограммы тех же случаев расположения БЦО в СО-2 (см. рис. 3) на глубине 15 и 44 мм, полученные методом ПВИ с межэлементными задержками Δt зондирующих сигналов, равными нулю. Очевидно, что при таких задержках фронт плоской волны должен быть параллелен апертуре АР, а направление его распространения точно по нормали к поверхности образца СО-2 в сторону донной поверхности. Но поскольку элементы решетки эффективно излучают УЗ сигналы только в секторе углов $35\text{--}85^\circ$, то в сторону отражателя даже при реальной одновременной посылке зондирующих импульсов элементами АР никакого фронта волны сформироваться не может. На отражатель последовательно будут падать импульсы от каждого элемента решетки.

Видно, что «лишние» зондирующие импульсы не только добавили фантомных образов в томограммы (рис. 6, в сравнении с рис. 5), но и сильно увеличили размеры образов БЦО. Причина этого в том, что при наклонном распространении зондирующих сигналов в направлении отражателя разность их времен падения на отражатель и также времен прихода эхосигналов к приемным элементам АР мала. Поэтому при реконструкции томограммы «лишние» эхосигналы просуммировались вблизи образа, формируемого основными эхосигналами.

Для анализа качества томограмм, получающихся при наклоне фронтов плоских волн в сторону отражателя, были реконструированы по 6 томограмм для каждой глубины БЦО (15 и 44 мм). Наклоны фронтов (или, что то же самое, направления их распространения) были выбраны в наиболее широком секторе углов, включающем направления 65 и 43° (см. рис. 3). Полученные изображения представлены на рис. 7 и 8. Общей закономерностью этих изображений является нарастание качества представления образа БЦО на фоне шума и фантомных образов от приближения угла α к значениям 65 и 43° для рис. 7 и 8 соответственно, т.е. к направляющим углам α_H БЦО [1]. Для направлений фронта, отличающихся от направления на отражатель на 15° и более, образ отражателя едва различим среди общего шума изображения, как, например, на рис. 7*a* или рис. 8*a*, 8*b* и 8*e*. А когда направление фронта почти совпадает с направлением на отражатель (рис. 7*d*, 8*z*), то качество изображения приближается к качеству от метода ЦФА. При точном совпадении углов фронта и направления на отражатель ($\alpha = \alpha_H$) получается почти точная фокусировка АР на этот конкретный отражатель (точная была бы при сходящимся фронте волны). Фокусируются на отражателе не только основные, но и большинство «лишних» эхосигналов. Обычно направление на отражатель не известно, причем, в зоне контроля может быть несколько отражателей. Поэтому зондировать ОК нужно несколько раз с разными направлениями фронтов волн в пределах сектора обзора зоны контроля.

На рис. 9*a* приведены графики абсолютных значений амплитуд образов БЦО в томограммах, представленных на рис. 7 и 8. За амплитуды образов в изображениях низкого качества, например, на рис. 7*b* или рис. 8*b* приняты средние значения амплитуд точек изображений в небольших зонах с центрами, совпадающими по координатам с образами на томограммах, полученных методом ЦФА (см. рис. 5).

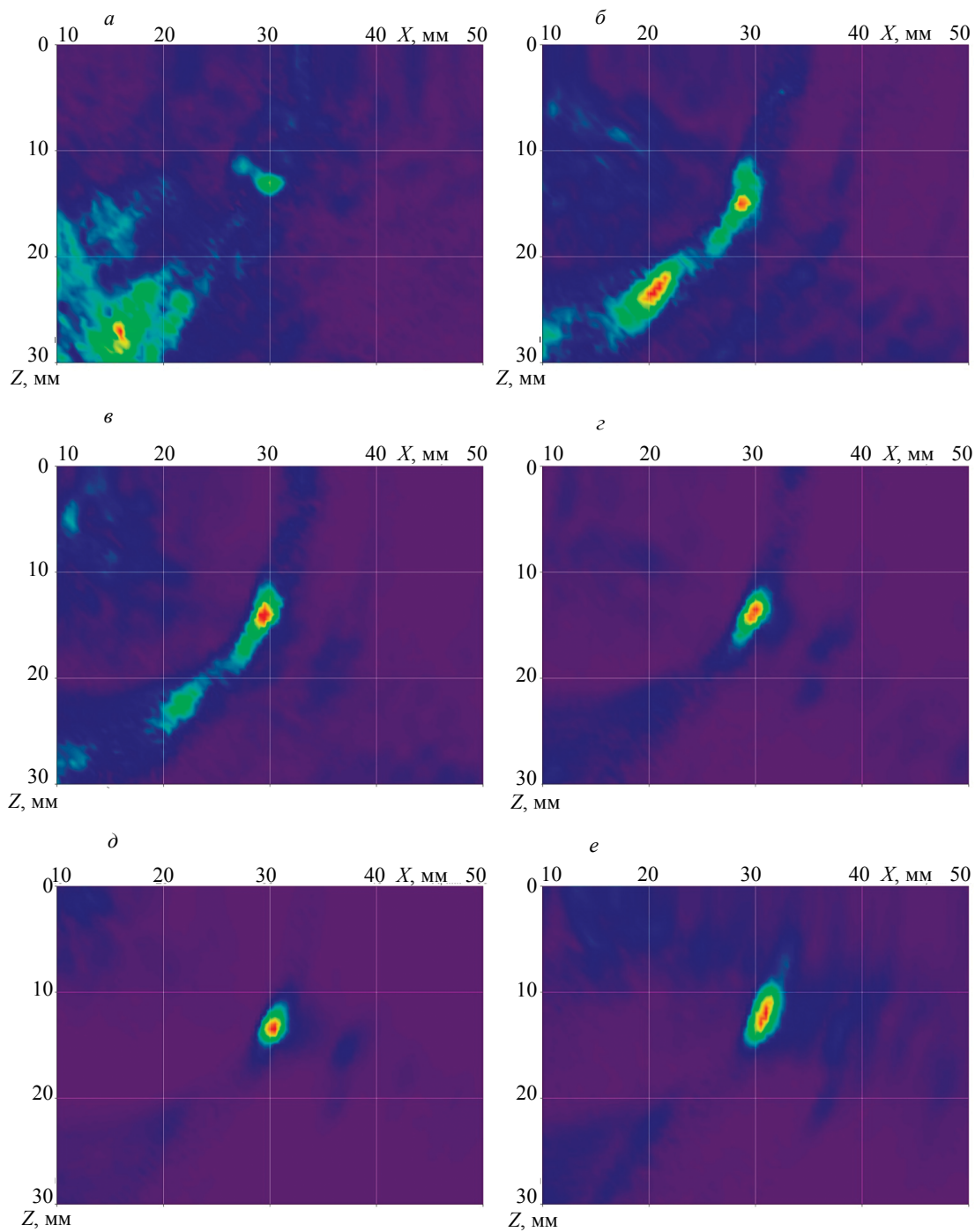


Рис. 7. Томограммы с образами боковых цилиндрических отверстий в СО-2 на глубине 15 мм, реконструированные методом ПВИ при разных направлениях распространения фронта плоской зондирующей волны:

a — под углом 40° ; $б$ — 52° ; $в$ — 56° ; $г$ — 61° ; $д$ — 67° ; e — 76° .

Из этих графиков видно, что амплитуда образа БЦО быстро уменьшается при отклонении угла фронта зондирующей волны от направляющего угла отражателя, что закономерно объясняется расфокусировкой «лишних» сигналов АР на этом отражателе. Это означает, что при суммировании изображений те из них, что получены при углах α , отличающихся на 5 и более градусов от α_H , будут давать существенно меньший вклад в суммарное изображение, чем изображение, полученное при $\alpha = \alpha_H$.

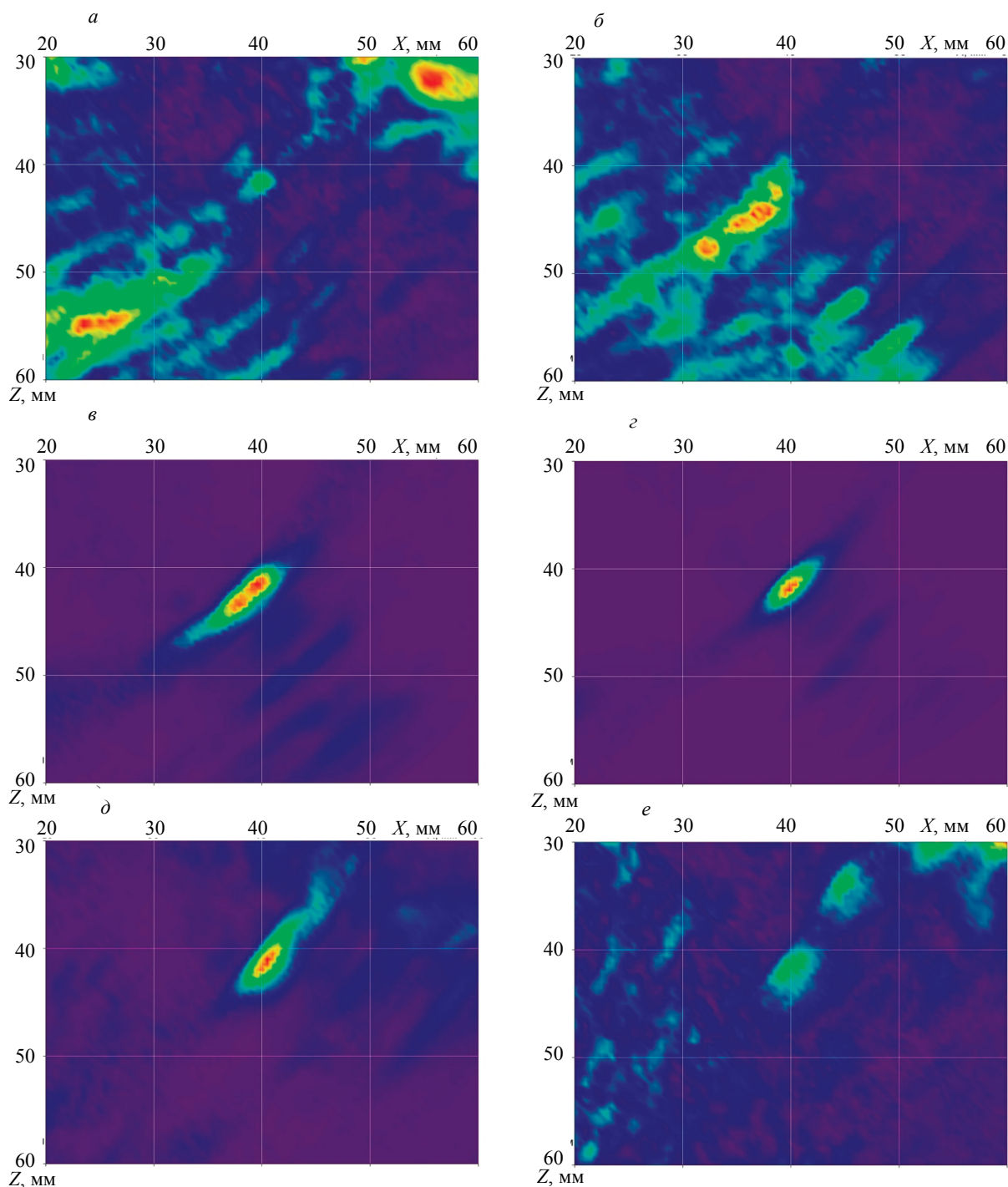


Рис. 8. Томограммы с образами боковых цилиндрических отверстий в СО-2 на глубине 44 мм, реконструированные методом ПВИ при разных направлениях распространения фронта плоской зондирующей волны: *a* — под углом 27°; *б* — 34°; *в* — 40°; *г* — 48°; *д* — 56°; *е* — 67°.

На рис. 10 изображены когерентные суммы шести томограмм для каждой глубины расположения БЦО, т.е. суммы изображений, представленных на рис. 7 и 8. Видно, что суммарные изображения ненамного уступают по качеству томограммам на рис. 5. Образы БЦО, если оценивать их по уровню минус 10 дБ от амплитуды (голубой цвет на шкале уровней), увеличены по фронту примерно на 25 %, по наклонной дальности («по лучу») — менее чем на 10 %. Несфокусированные следы эхосигналов от БЦО эллиптической формы стали более заметны, увеличилось количество

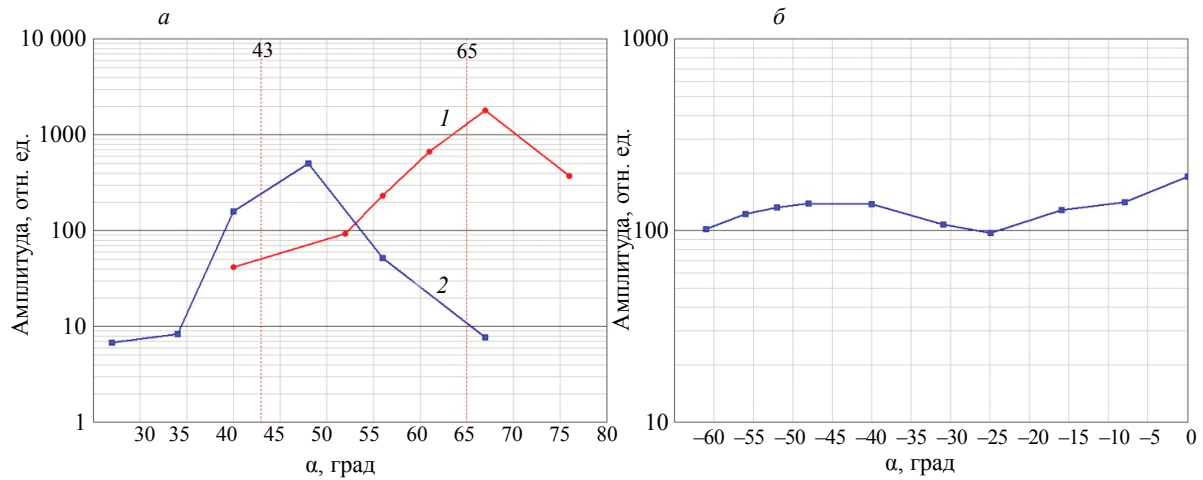


Рис. 9. Зависимости амплитуд образов БЦО в изображениях, реконструированных методом ПВИ, от угла направления фронта волны:

a — для направлений в сторону БЦО (1 — глубина БЦО 15 мм, 2 — глубина 44 мм); *б* — для направлений от БЦО на глубине 44 мм.

фантомов и их уровень. В частности, появился фантом от реверберационных шумов АР на изображении (рис. 10*a*) в зоне $x = 10\text{—}15$ мм, $z = 0\text{—}3$ мм.

Поскольку в изображениях на рис. 10 нет шумов, равномерно распределенных по полю, то оценим отношения сигнал/шум в них отношением амплитуды образа БЦО к наибольшей амплитуде фантомного образа независимо от его координат. В томограмме на рис. 10*a* это отношение составило 16,6 дБ. Наибольший по амплитуде образ — вызван реверберационным шумом АР. Амплитуда фантома от волн обегания—соскальзывания при $x = 37,4$, $z = 15,2$ мм здесь стала равной минус 18,2 дБ (в томограмме на рис. 5*a* была минус 18,3 дБ). В томограмме на рис. 10*б* отношение сигнал/шум составило 23,2 дБ, которое измерено относительно фантома с координатами $x = 42,5$, $z = 50,1$ мм. В томограмме на рис. 5*б* отношение сигнал/шум было 25,1 дБ.

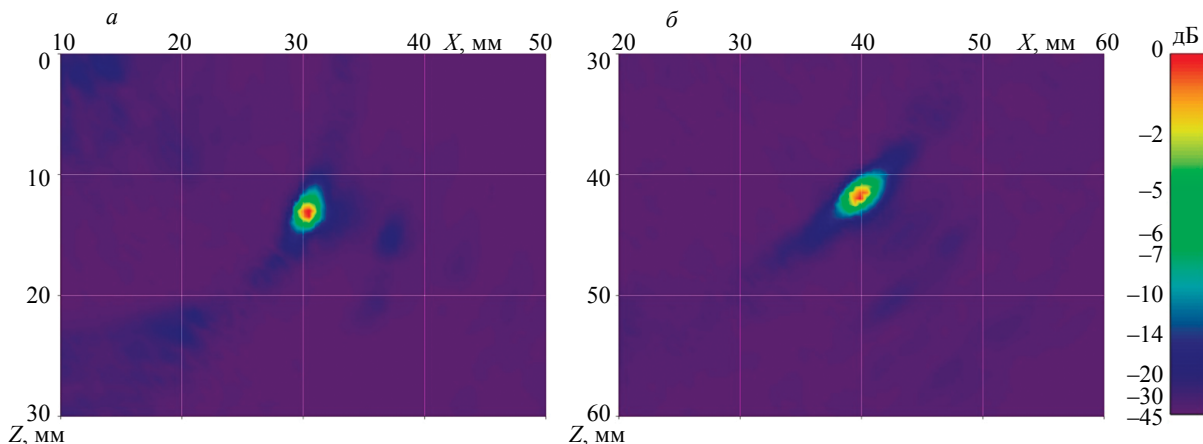


Рис. 10. Томограммы с образами боковых цилиндрических отверстий в СО-2, реконструированные методом ПВИ при 6 углах наклона фронтов плоских волн:

a — БЦО на глубине 15 мм; *б* — 44 мм.

Из этих экспериментов видно, что, используя метод ПВИ, можно получать изображения с достаточно высоким качеством при малом количестве циклов излучения—приема сигналов. Причем это количество циклов напрямую не связано с количеством N элементов АР. Амплитуда образа отражателя пропорциональна количеству суммируемых эхосигналов от него, т.е. пропорциональна N^2 . А амплитуды фантомов вследствие случайного несовпадения фаз эхосигналов

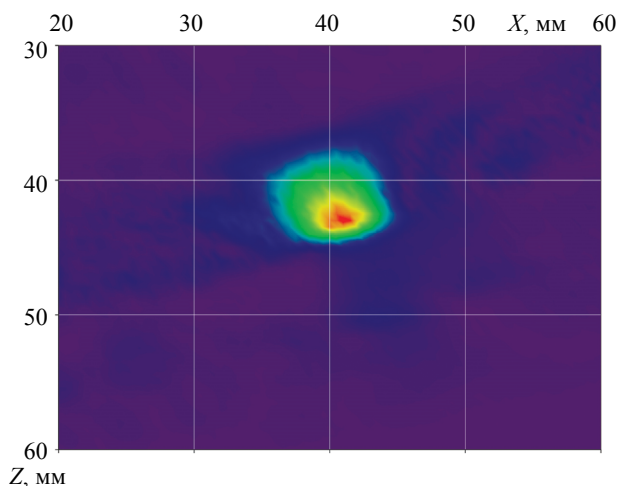


Рис. 11. Томограмма с образом бокового цилиндрического отверстия в СО-2 на глубине 44 мм, реконструированная методом ПВИ при наклоне волнового фронта 48° с использованием расчета времени распространения фронта.

в среднем пропорциональны N , поэтому с увеличением количества элементов решетки качество изображений должно возрастать при неизменном количестве циклов излучение—прием.

На рис. 11 приведено изображение БЦО на глубине 44 мм в СО-2 при наклоне волнового фронта 48° . Оно реконструировано на основе расчета времени распространения волнового фронта от АР до отражателя, т.е. так же, как в работах [5, 10—12]. Изображение при таком ракурсе уже было нами ранее получено при полном расчете времен всех траекторий (см. рис. 8з). Видно, что изображение на рис. 11 существенно уступает изображению на рис. 8з как по размеру образа БЦО, так и по количеству фантомных образов. Значительную площадь занимает ореол зеленого цвета (уровень минус 5 дБ) вокруг амплитудного значения образа БЦО. Ореол вызван расфокусировкой множества эхосигналов из-за того, что времена их задержки были неправильно учтены при реконструкции изображения. При данном взаимном расположении АР и отражателя допустимый диапазон изменения углов наклона фронтов лежит между 37 и 48° . Попытка просуммировать несколько изображений, полученных при углах фронта в этом диапазоне, не дала заметного улучшения качества суммарного изображения в сравнении с одиночным на рис. 11. Это означает, что расчет траекторий по времени фронта приводит к ухудшению качества изображений.

Межэлементные задержки зондирующих сигналов обеспечивают формирование наклонного плоского волнового фронта, но независимо от величин этих задержек зондирующие сигналы от каждого элемента АР и эхосигналы от любых отражателей распространяются в среде по одним и тем же траекториям. Поэтому можно рассматривать процесс зондирования—приема сигналов обособленно для каждой пары элементов АР (излучатель—приемник), т.е. не привлекая к его анализу понятия наклонного волнового фронта. Изображения, полученные нами ранее с задержками, равными нулю (см. рис. 6), когда физически не мог образоваться фронт волны, подтверждают это. Значит, изображения можно получать при зондировании объекта с любыми межэлементными задержками. Даже метод ЦФА можно считать предельным случаем очень больших межэлементных задержек зондирующих сигналов.

Используя тот же массив исходных реализаций для БЦО в СО-2 на глубине 44 мм, были реконструированы несколько томограмм при разных отрицательных значениях межэлементных задержек. В волновой трактовке отрицательные задержки создают наклон фронта виртуальной волны в противоположную сторону от отражателя (влево вниз по рис. 3). Физически УЗ волны в противоположную сторону не могут излучаться используемой АР. При задержках по модулю более 525 нс угол наклона фронта становится комплексным, т.е. нереальным. Тем не менее изображения реконструируются.

На рис. 9б приведен график амплитуд образов БЦО на глубине 44 мм в томограммах, полученных при наклонах виртуального фронта плоской волны под углами -8 , -16 , -25 , -31 , -40 , -48 , -52 , -56 и -61 град. Амплитуда образа в этом случае намного меньше зависит от угла наклона фронта, чем при его наклоне в сторону отражателя. Причина этого в отсутствии эффекта фокусировки «лишних» эхосигналов на отражателе. При суммировании изображений, полученных в отрицательной области углов фронта, все слагаемые дают почти одинаковый вклад в суммарное изображение.

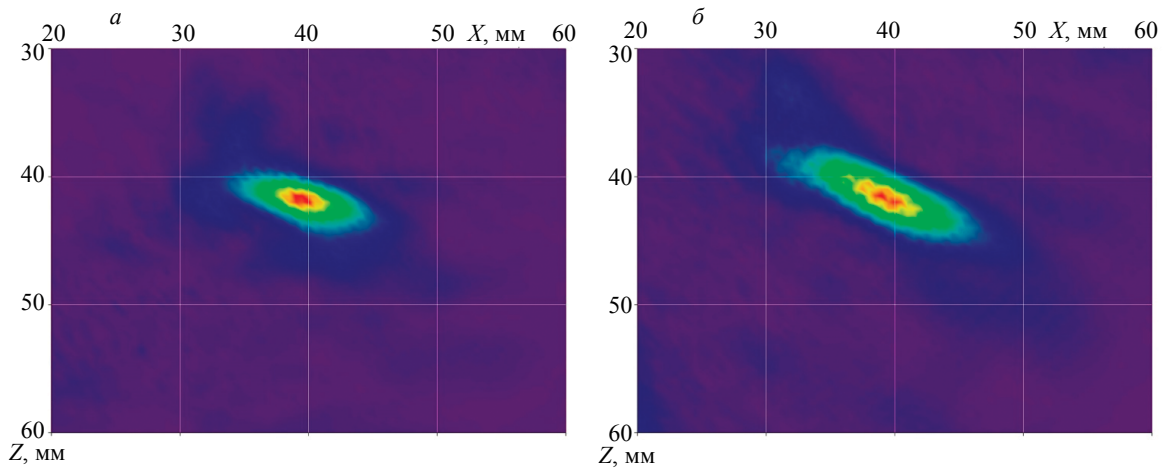


Рис. 12. Томограммы с образами бокового цилиндрического отверстия в СО-2 на глубине 44 мм, реконструированные методом ПВИ при отрицательных углах «наклона фронтов плоских волн»:
a — угол наклона минус 16°; *б* — минус 61°.

На рис. 12 для примера показаны изображения, построенные при углах наклона фронта волн -16 и -61° . Размеры образов БЦО в них достаточно большие в направлении наклонной дальности. Но в отличие от изображений на рис. 7 и 8, здесь образы близки по амплитуде, и, главное, кроме них нет ни одного фантома с соизмеримой амплитудой. Все фантомы как минимум на 10—15 дБ ниже. И все остальные изображения, полученные при отрицательных углах фронта, выглядят аналогично.

На рис. 13 представлена томограмма, полученная при суммировании 5 изображений, построенных при углах фронта -8 , -31 , -40 , -48 и -56 град. Образ БЦО на ней больше образа на томограмме от ЦФА (см. рис. 5б) на 6 % по фронту и на 25 % в направлении «по лучу» (по уровню минус 10 дБ). Отношение сигнал/шум равно 17,7 дБ. Координаты фантома с наибольшей амплитудой: $x = 35$, $z = 38,7$ мм.

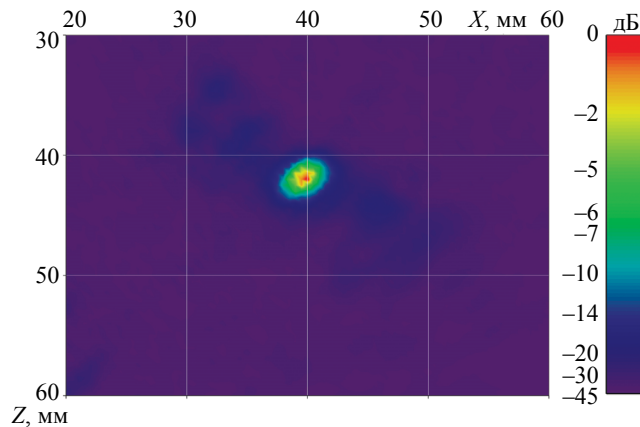


Рис. 13. Томограмма с образом бокового цилиндрического отверстия в СО-2 на глубине 44 мм, реконструированная методом ПВИ при 5 отрицательных углах «наклона фронтов плоских волн».

Особенность всех томограмм, полученных при отрицательных углах волнового фронта, включая и суммарные томограммы, в том, что фантомные образы от «лишних» эхоимпульсов группируются, в основном, вдоль направления «по лучу», а не по фронту в форме эллипсов, как на томограммах при положительных углах. В частности, на рис. 13 такие эллиптические следы отсутствуют совсем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован метод ультразвуковой визуализации внутренней структуры объекта при зондировании его всеми элементами антенной решетки внутри одного цикла излучение—прием.

Оценено качество получаемых изображений как от одного цикла излучение—прием, так от результата суммирования нескольких таких изображений в сравнении со стандартным методом цифровой фокусировки апертуры антенной решетки.

2. Реконструированы томограммы образца СО-2 при зондировании его с разными межэлементными задержками зондирующих сигналов или в волновом представлении с разными углами наклона фронта зондирующей волны. При межэлементных задержках, создающих реальный волновой фронт, распространяющийся в сторону отражателя, качество изображения существенно зависит от того, насколько точно направление фронта совпадает с направлением на отражатель. Чем точнее, тем выше качество. В то же время при задержках, соответствующих виртуальному волновому фронту, т.е. не существующему физически, изображение тоже реконструируется, причем его качество слабо зависит от направления распространения этого «фронта».

3. Показано, что когерентная сумма 5-6 томограмм, реконструированных при разных углах наклона фронта как реального, так и виртуального, незначительно уступает по качеству фокусировки и отношению сигнал/шум томограмме от метода цифровой фокусировки апертуры. Это означает, что исследованный метод визуализации требует меньшего времени на сбор ультразвуковых данных на объекте контроля по сравнению с методом цифровой фокусировки апертуры. Это важно при высокоскоростном ультразвуковом контроле.

4. Метод ПВИ можно трактовать в широком смысле как метод визуализации объектов многократным зондированием с вариацией межэлементных задержек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Смородинский Я.Г. Термины ультразвукового контроля с антенными решетками и что они означают // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 31—40.
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Lines David, Wharrie James, Hottenroth John, Skramstad Jesse, Goodman Ron, Wood Nancy. Real-Time Ultrasonic Array Imaging using Full Matrix Capture and the Total Focusing Method / Proceedings of 2nd Aircraft Airworthiness & Sustainment Conference, San Diego, 18— 21 April 2011.
4. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
5. Le Jeune L., Robert S., Lopez Villaverde E., Prada C. Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging // Ultrasonics. 2016. V. 64. No. 1. P. 128—138.
6. Tanter M., Bercoff J., Sandrin L., Fink M. Ultrafast compound imaging for 2D motion vector estimation: Application to transient elastography // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2002. V. 49. No. 10. P. 1363—1374.
7. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., N. Benech N., Fink M. Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2009. V. 56. No. 3. P. 489—506.
8. Madore B., White P., Thomenius K., Clement G. Accelerated focused ultrasound imaging // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2009. V. 56. No. 12. P. 2612—2623.
9. Garcia D., Tarnec L., Muth S., Montagnon E., Poreé J., Cloutier G. Stolt's f-k migration for plane wave ultrasound imaging // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2013. V. 60. No. 9. P. 1853—1867.
10. Merabet L., Robert S., Prada C. Comparative study of 2D ultrasound imaging methods in the f-k domain and evaluation of their performances in a realistic NDT configuration // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2019. V. 66. No. 4. P. 772—788.
11. Merabet L., Robert S., Prada C. The multi-mode plane wave imaging in the Fourier domain: Theory and applications to fast ultrasound imaging of cracks // NDT & E International. March 2020. V. 110. P. 102171.
12. Bazulin E.G., Evseev I.V. Applying Plane Wave Imaging Technology in Ultrasonic Nondestructive Testing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 6. P. 423—436 [Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Применение технологии Plane Wave Imaging в ультразвуковом неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 3—16.]
13. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая антенная решетка // Патент РФ № 2335038. Бюлл. изобр. № 27. 2008.
14. Tremblay Patrick, Richard Daniel. Development and Validation of a Full Matrix Capture Solution. 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 22-24, 2012 - Seattle, Washington, USA (JRC-NDE 2012). <https://www.ndt.net/article/jrc-nde2012/papers/79.pdf>. (Дата обращения: 05.12.2021).
15. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Оценка дефектов при ультразвуковом контроле методом цифровой фокусировки апертуры. Условия, возможности, границы применимости // Контроль. Диагностика. 2017. № 9. С. 4—16.