

УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ ШУМА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ PLANE WAVE IMAGING

© 2022 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, И.В. Евсеев²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»,
Россия 123458, Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

²Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет),
Россия 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022; после доработки 12.04.2022

Принята к публикации 13.05.2022

Восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенной решеткой (ЦФА) имеет ряд недостатков, таких как большой объем измеренных эхосигналов и малая энергия ультразвуковых волн, вводимая в объект контроля (ОК). Второе обстоятельство может привести к малому отношению сигнал/шум в объектах контроля с высоким поглощением. Метод Plane Wave Imaging (PWI) позволяет совместить преимущества технологии фазированных антенных решеток (ФАР) и технологии ЦФА. В режиме PWI при излучении плоской волны излучают все элементы антенной решетки (АР), как в ФАР-режиме, что увеличивает вводимую в ОК энергию. Для получения изображения обычно используют от 15 до 20 плоских волн. Это приводит к уменьшению объема измеренных эхосигналов, повышению скорости их регистрации и уменьшению уровня шума изображения. Так как в ультразвуковом неразрушающем контроле часто используют АР, установленные на наклонные призмы, то была разработана версия PWI, учитывающая это обстоятельство. Модельные эксперименты показали, что метод PWI по сравнению с методом ЦФА позволяет получать изображения отражателей с меньшим уровнем шума в случае использования призмы как для материалов с большим поглощением, так и для материалов с высоким уровнем структурного шума.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Plane Wave Imaging (PWI), Total Focusing Method (TFM).

DOI: 10.31857/S0130308222070016, EDN: BOBNYQ

1. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации промышленных объектов актуальной задачей является получение информации об их внутренней структуре для безаварийной работы. Один из способов ее решения — это восстановление изображения отражателей при излучении и приеме ультразвуковых волн в объект контроля (ОК). В настоящее время широкое применение в практике ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием антенных решеток (АР): фазированные антенные решетки (ФАР) [1] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [2]. В работе [3] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображения отражателей.

Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей со сплошной фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). На первом этапе регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC) [4]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется выстрел, а набор эхосигналов по всем выстрелам будем называть залп. На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [5] восстанавливается изображение отражателей. Корректнее использовать название Total Focusing Method (TFM) [6]. Однако метод ЦФА имеет недостатки, и первый заключается в том, что регистрируется большой объем эхосигналов, который растет квадратично количеству ее элементов N_e . Для линейной 32-элементной АР количество измеренных эхосигналов (залп) равно $N_e^2 = 1024$, а для 64-элементной — уже 4096. Второй недостаток ЦФА — это небольшая акустическая энергия, которая вводится в объект контроля каждым элементом АР. Третий недостаток — большое время восстановления изображения по эхосигналам методом C-SAFT во временной области. Однако метод C-SAFT хорошо распараллеливается и для его ускорения можно воспользоваться технологиями CUDA [7] или технологией ПЛИС [8]. Разработаны методы получения изображения отражателей при обработке эхосигналов в области пространственного спектра [9, 10]. Так как при расчетах в этих методах основной операцией является преобразование Фурье, то

выполняя его по технологии быстрого преобразования, время восстановления изображения можно существенно уменьшить.

Для решения упомянутых проблем в медицинской диагностике была разработана технология Plane Wave Imaging (PWI) [11, 12]. Для использования в неразрушающем контроле технология была модифицирована [13—15]. Технологию PWI можно рассматривать как симбиоз технологий ФАР и ЦФА. Излучение плоской волны под заданным углом в ОК происходит всеми элементами АР, как в режиме ФАР. Эхосигналы регистрируются всеми элементами без задержек, как в методе ЦФА. После регистрации эхосигналов для заданного набора плоских волн изображение отражателей восстанавливается методом C-SAFT. Как показывает опыт, число углов излучения плоской волны может быть в диапазоне от 10 до 20 [16], что повышает по сравнению с режимом FMC скорость регистрации эхосигналов 32-элементной линейной АР примерно в два или три раза, а для 64-элементной — в три или шесть раз. Так как в режим PWI излучение происходит всеми элементами АР, то в ОК вводится больше энергии в сравнении с режимом FMC. Это может оказаться очень важным при контроле ОК из материалов с большим поглощением (полиэтилен, плексиглас и т.п.). К сожалению, увеличение энергии, вводимой в объекты контроля со структурным шумом, не приведет к повышению отношения сигнал/шум (ОСШ). Для уменьшения уровня структурного шума, кроме известного приема, связанного с уменьшением длительности импульсов за счет математической обработки эхосигналов [17], можно воспользоваться способом, предложенным в работе [18], и который будет рассмотрен в следующем разделе.

2. ОБЪЕДИНЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ФАКТОРА

Увеличить ОСШ при использовании АР можно следующим образом. Пусть АР находится в точке $\mathbf{r}_w$. Обозначим через $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ ЦФА-изображение, восстановленное в заданных точках $\mathbf{r}_i$ ОВИ по выстрелу номер m , т.е. по эхосигналам, измеренным всеми элементами АР при излучении элементом номер m . Тогда обычное ЦФА-изображение можно получить, сложив когерентно все изображения по выстрелам:

$$I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = \sum_{m=1}^{N_e} I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w), \quad (1)$$

где N_e — число элементов АР.

Но объединить парциальные повывстрельные изображения $I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ можно и иными способами. Например, можно рассчитать когерентный фактор для каждой точки $\mathbf{r}_i$ повывстрельных изображений по формуле:

$$I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = CF(I_m(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)), \quad (2)$$

а в качестве восстановленного изображения рассматривать функцию:

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \cdot I_{CF}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \quad (3)$$

Важное свойство когерентного фактора состоит в том, что при отсутствии шума амплитуды CF бликов отражателей равны единице. Поэтому амплитуды бликов изображения, полученные по формуле (1) или (3), будут примерно одинаковы.

В режиме тройного сканирования, когда АР сканирует, итоговое изображение можно получить по формулам (1) или (3), но в качестве парциальных изображений будут использоваться N_p изображений $I_S(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ или $I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$, восстановленных для каждого положения АР:

$$I(\mathbf{r}_i) = \sum_{p=1}^{N_p} I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_{w,p}). \quad (4)$$

Понятно, что такой подход подходит и для повышения качества изображения при регистрации эхосигналов в режиме PWI.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для регистрации эхосигналов использовался ЦФА-дефектоскоп «АВГУР АРТ», разработанный и изготавливаемый «Научно-производственным центром неразрушающего контроля «ЭХО+» [19].

3.1. Образцы с отражателями малых размеров или с высоким поглощением

Для образцов такого типа уровень шума изображения отражателей определяется малыми размерами отражателя или высоким поглощением в ОК. И в первом, и во втором случае приходится увеличивать усиление при регистрации эхосигналов. Для таких случаев шум можно считать шумом белым, что позволяет предположить эффективную работу технологии PWI.

3.1.1. Образец с ПДО диаметром 1 мм на глубине 36 мм

Образец толщиной 60 мм с гранями с углом наклона 30 град был изготовлен из стали Ст20 со скоростью продольной волны 5,9 и поперечной 3,23 мм/мкс. В образце сделано четыре плоскодонных цилиндрических отверстий (ПДО) диаметром 1,0 мм, с глубиной залегания 2, 10, 20 и 36 мм. Для регистрации эхосигналов от ПДО № 4 на глубине 36 мм использовалась АР с частотой 5 МГц с 64 элементами размерами 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 35 град (стрела 40 мм, пробег в призме 20 мм). АР находилась на поверхности образца левее ПДО № 4 на расстоянии примерно –36 мм.

На рис. 1а представлено ФМС-изображение¹, полученное как когерентная сумма по формуле (1), а на рис. 1б — с учетом CF по формуле (3), и которое далее будем обозначать как ФМС×CF-изображение. На изображения линиями черного цвета нанесены контуры ПДО № 4. На обоих изображениях из-за высокого уровня шума идентифицировать блик ПДО № 4 не удастся, так как ОСШ можно оценить как –3дБ.

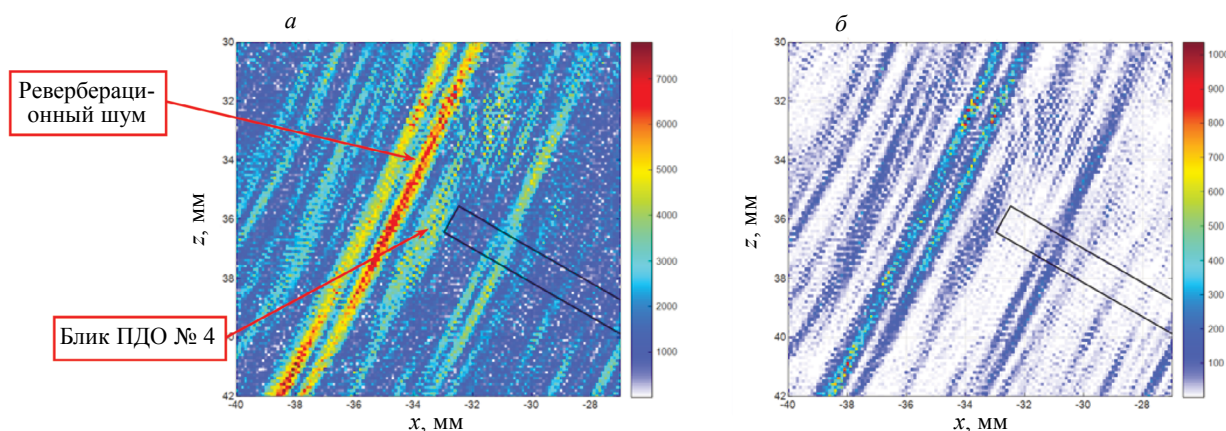


Рис. 1. Изображения ПДО № 4, полученные по эхосигналам измеренным методом ФМС при сложении повывстрельных парциальных изображений (а) и с учетом CF (б).

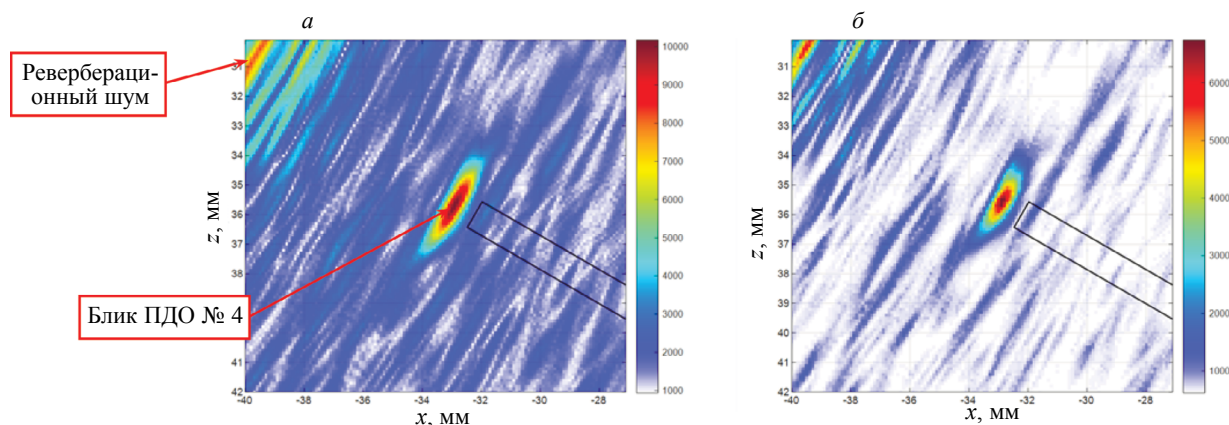


Рис. 2. Изображения ПДО № 4, полученные по эхосигналам измеренным методом PWI при сложении повывстрельных парциальных изображений (а) и с учетом CF (б).

¹Использование цвета для пояснения рисунков доступно только в электронном варианте статьи или в ее печатном издании журнала «Дефектоскопия».

На рис. 2а показано PWI-изображение, полученное как когерентная сумма по формуле (1), а на рис. 2б — с учетом CF по формуле (3). На изображения линиями черного цвета нанесены контуры ПДО № 4. На обоих изображениях блик ПДО № 4 можно уверенно обнаружить, так как ОСШ на $PWI \times CF$ -изображении повысился примерно на 10 дБ.

3.1.2. Сварное соединение в трубопровод толщиной стенки 120 мм из полиэтилена

В образце трубопровода со сварным соединением толщиной стенки 120 мм из полиэтилена были просверлены 5 боковых цилиндрических отверстий (БЦО) диаметром 3 мм на глубинах 20, 40, 60, 80 и 100 мм. Трубопровод состоит из двух слоев, которые хорошо видны на рис. 3, так как слои отличаются цветом. Неровность поверхности образца (рис. 3, выноска справа) достигает 1,5 мм. На левой выноске рис. 3 показана фотография корня сварного соединения, на котором обозначены точки L и R, стрелки желтого цвета определяют систему координат.

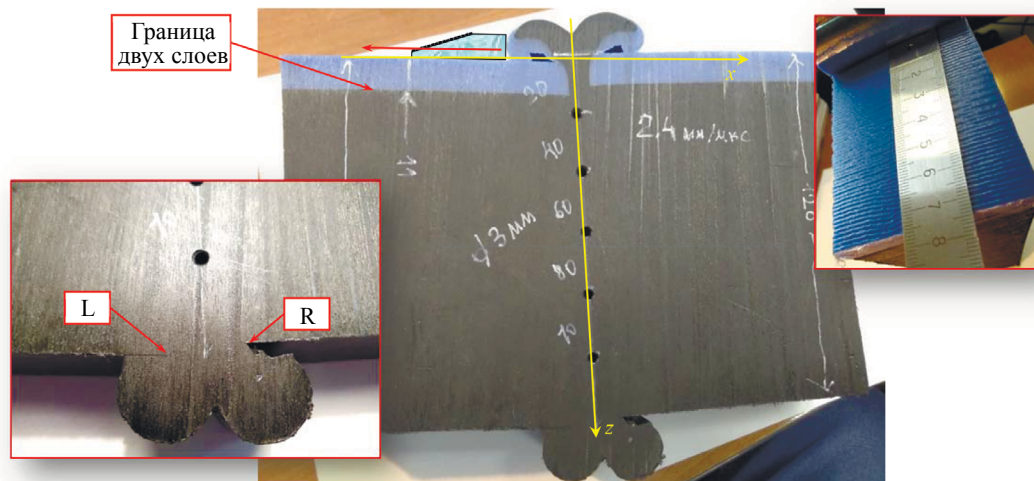


Рис. 3. Фрагмент трубопровода толщиной 120 мм из полиэтилена.

Для регистрации экосигналов в режиме тройного сканирования использовалась АР с частотой 2,25 МГц и 20 элементами размером 1,1 мм с зазором между краями элементов 0,1 мм, установленная на плексигласовую призму с углом наклона 20 град. АР перемещалась по поверхности образца 35 раз с шагом 1 мм. Апертура сканирования (стрелка красного цвета) и АР в начале апертуры схематически показаны на рис. 3.

На рис. 4а показано FMC-изображение, объединенное по формулам (1) и (4), на котором видны блики БЦО за исключением самого верхнего. То, что не удалось увидеть блик самого верхнего

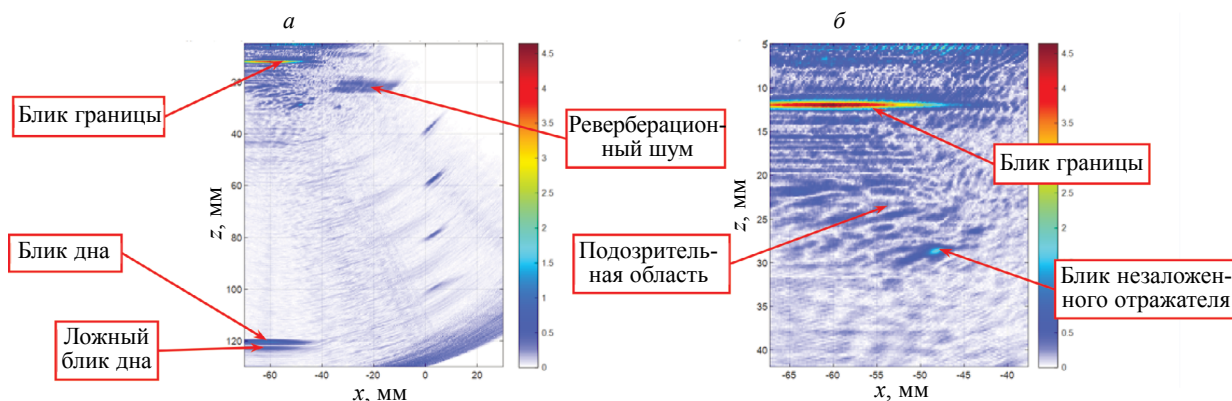


Рис. 4. FMC-изображение (а) и его фрагмент (б).

БЦО, объясняется тем, что скорость продольной волны материала призмы равна 2,7 мм/мкс, а скорость продольной волны в полиэтилене высокого давления — около 2,4 мм/мкс, поэтому максимальный угол ввода в ОК равен 58 град. Выбор для призмы другого материала, например, рексолита позволит вводить ультразвук в трубу под большими углами. На рис. 4б хорошо видна граница между материалами черного и голубого цвета, блик незаложенного отражателя и подозрительная область с бликами малой амплитуды. Неровная граница поверхности образца (см. рис. 3, выноска справа) привела к тому, что на изображении появился ложный блик дна из-за того, что зондирующий импульс многократно перерассеивается на неровностях поверхности, заполненных глицерином, который использовался в качестве контактной жидкости.

На рис. 5 показано FMC×CF-изображение, объединенное с учетом когерентного фактора по формулам (3) и (4). Отношение сигнал/шум по сравнению с рис. 4а, возросло примерно на 8 дБ, однако амплитуда блика самого глубокого БЦО уменьшилась примерно на 6 дБ. Это объясняется тем, что уровень шума достаточно близок к амплитуде этого БЦО.

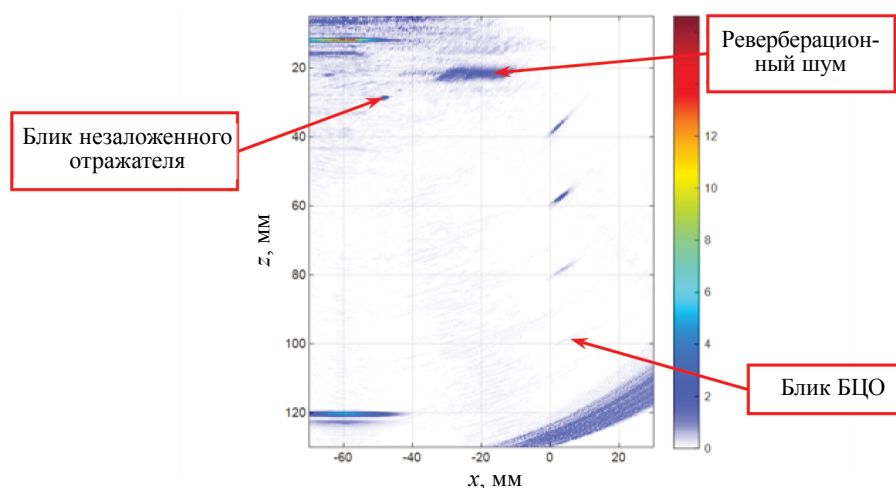


Рис. 5. FMC×CF-изображение.

На рис. 6 показано PWI-изображение, объединенное по формулам (1) и (4), на котором видны блики БЦО за исключением самого верхнего. По сравнению с рис. 4а уровень шума в области бликов БЦО уменьшился примерно на 6 дБ, но реверберационный шум стал больше. Из-за многократного перерассеивания зондирующего импульса на неровностях, заполненных глицерином, на PWI-изображении появились ложные блики довольно значительной амплитуды.

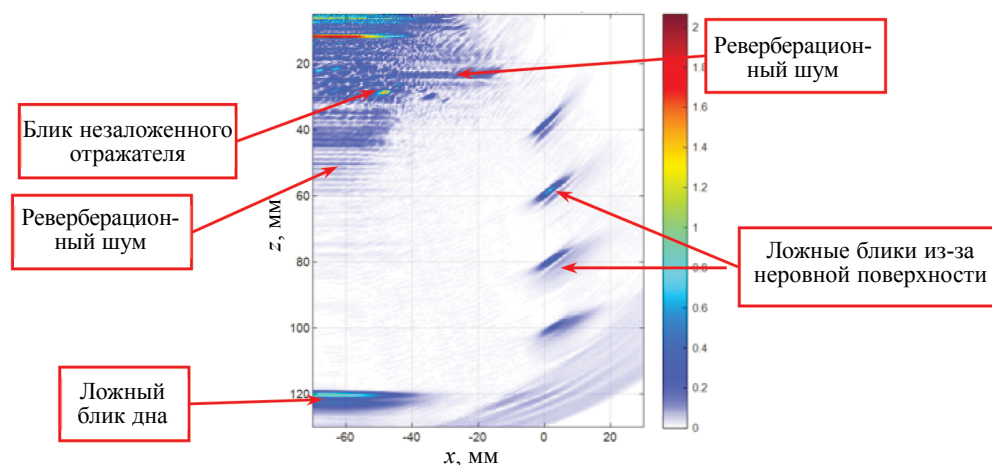


Рис. 6. PWI-изображение.

На рис. 7а показано PWI×CF-изображение, объединенное с учетом когерентного фактора по формулам (3) и (4). ОСШ по сравнению с рис. 6 возросло примерно на 10 дБ. Можно предположить, что на этом изображении видны точки L и R, показанные на левой выноске рис. 3. Блик между ними скорее всего сформирован по акустической схеме «прямой луч — отражатель — луч с отражением от дна». Появление такого блика характерно при использовании одноэлементных преобразователей или при контроле ОК большой толщины АР малых размеров. На рис. 7б показан фрагмент изображения. На нем подтверждается наличие незаложенного рассеивателя и подозрительной области, которые видны и на рис. 4а.

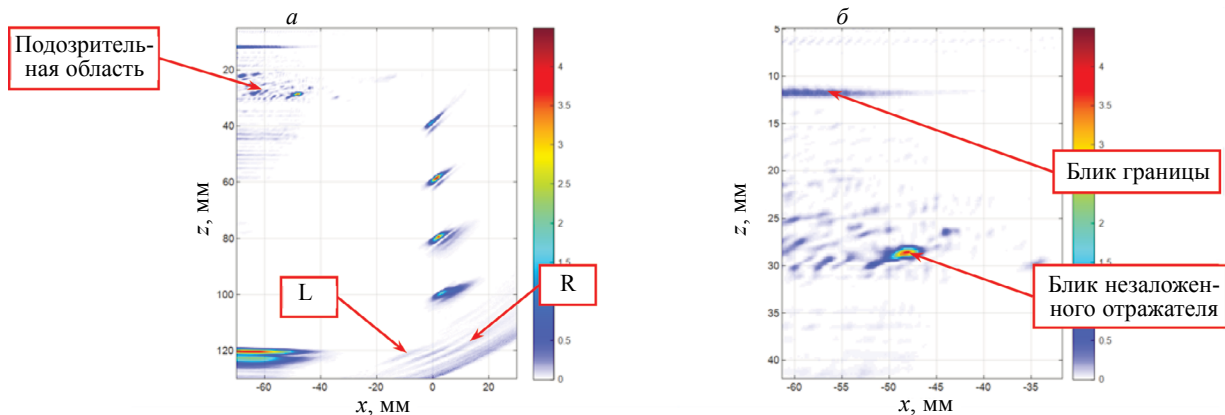


Рис. 7. PWI×CF-изображение (а) и его фрагмент (б).

3.2. Образцы с высоким структурным шумом

Режим PWI изначально не предназначался для работы с ОК из материалов с высоким уровнем структурного шума, так как увеличение энергии, излучаемой в образец, существенно не должно увеличивать ОСШ. Поэтому не стоит ожидать значительного уменьшения уровня структурного шума изображений, полученных по PWI-эхосигналам, в отличие от контроля объектов из материалов с высоким поглощением.

3.2.1. Образец с аустенитным V-образным сварным соединением

В образце толщиной 52 мм из нержавеющей стали с аустенитным V-образным сварным соединением было просверлено три БЦО диаметром 4 мм, которые пронумерованы от 1 до 3. Для регистрации эхосигналов использовалась АР с частотой 5 МГц и 64 элементами размером 0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 17 град (стрела 40 мм, пробег в призме 10 мм). Антенная решетка перемещалась по поверхности образца 5 раз с шагом 6 мм (режим тройного сканирования). Аустенитное сварное соединение незаметно на фотографии и поэтому показано на рис. 8 многоугольником с полупрозрачной заливкой желтого цвета, стрелка красного цвета соответствует области сканирования, стрелки желтого цвета определяют систему координат. АР схематически показана на рис. 8 в начальной точке апертуры сканирования.

3.2.1.1. Призма расположена на расстоянии –21 мм

Так как при таком расположении АР наиболее плохо будет восстанавливаться изображение БЦО № 1, расположенное у поверхности, то сосредоточим внимание на нем. На рис. 9 представлено FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б). На изображениях линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 1. На обоих изображениях из-за ОСШ, равным примерно –3 дБ, идентифицировать блик БЦО № 1 не удастся.

На рис. 10 представлено PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б). ОСШ PWI×CF-изображения возросло более чем на 12 дБ по сравнению с PWI-изображением. На обоих изображениях удастся уверенно идентифицировать блик БЦО № 1.

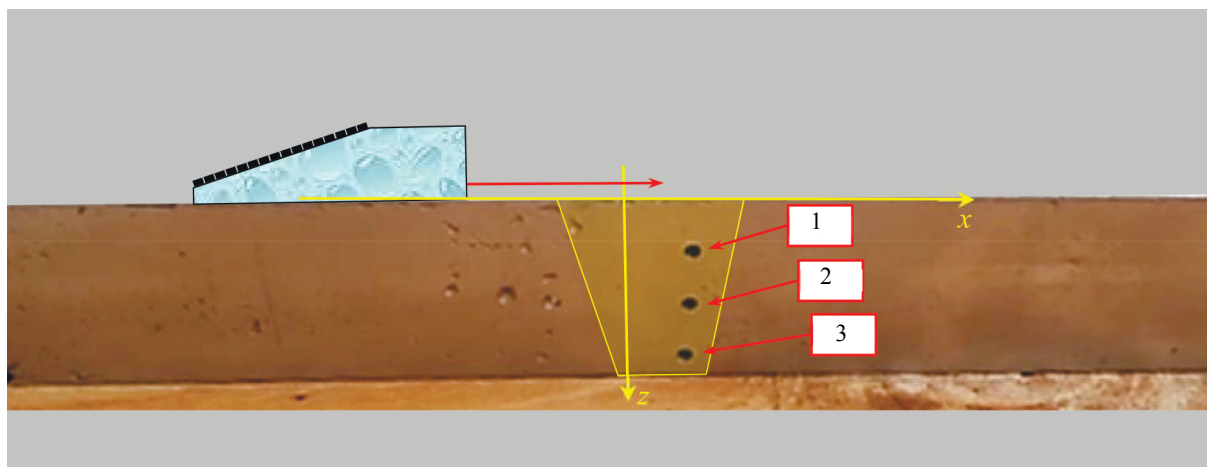


Рис. 8. Образец с аустенитным V-образным сварным соединением.

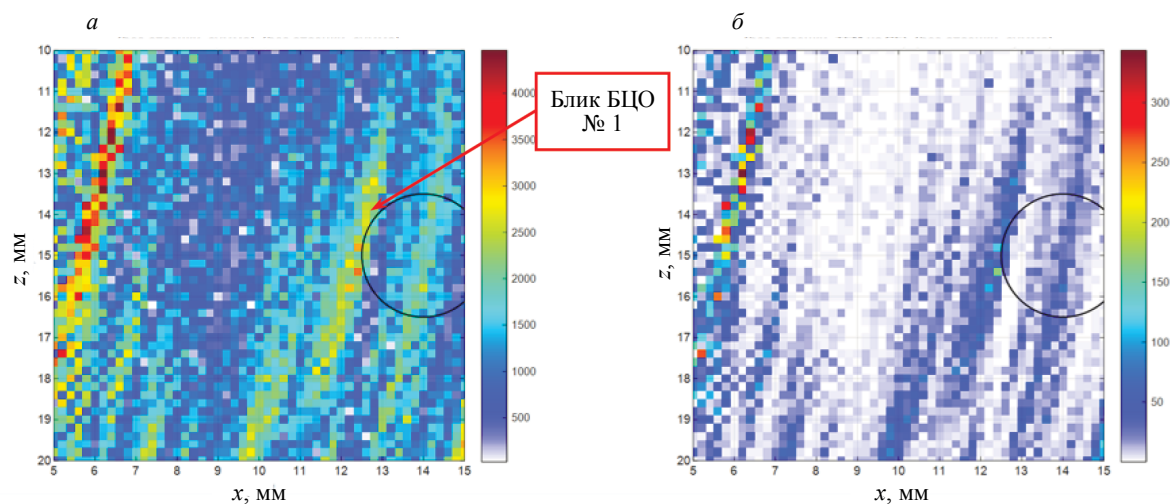


Рис. 9. FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 1.

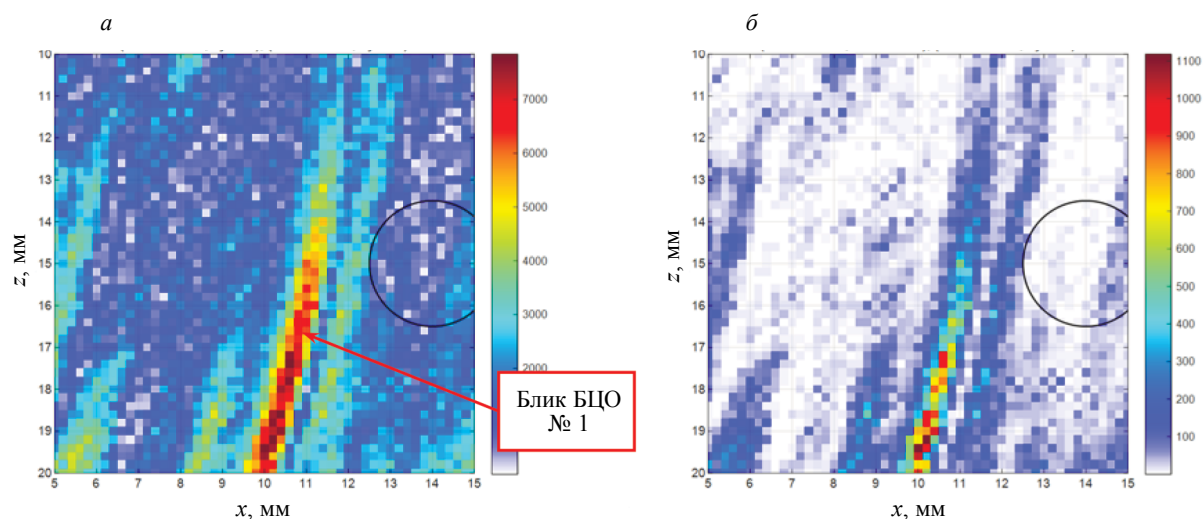


Рис. 10. PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 1.

На рис. 11 показано FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения. На обоих рисунках хорошо видна левая граница сварного соединения, структурный шум сварного соединения и границы БЦО № 2 и № 3, а вот блик границы БЦО № 1 заметен только на рис. 11б.

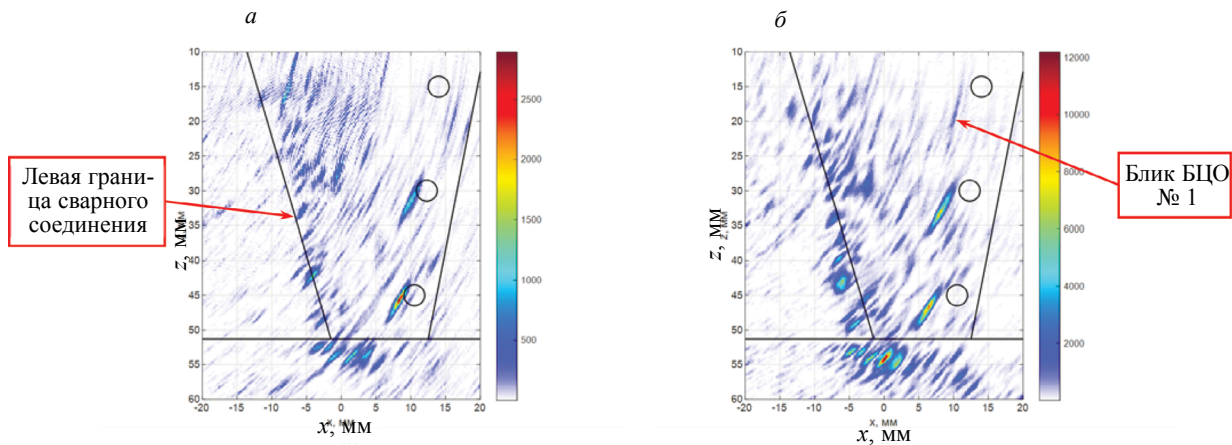


Рис. 11. FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения.

3.2.1.2. Режим тройного сканирования

На рис. 12 показано FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения, полученные в режиме тройного сканирования. На обоих рисунках хорошо видна левая граница сварного соединения, структурный шум сварного соединения и границы БЦО № 2 и № 3. Уровень шума по сравнению с рис. 11 уменьшился примерно на 8 дБ, а фронтальная разрешающая способность возросла примерно в два раза. Блик границы БЦО № 1 заметен только на рис. 11б.

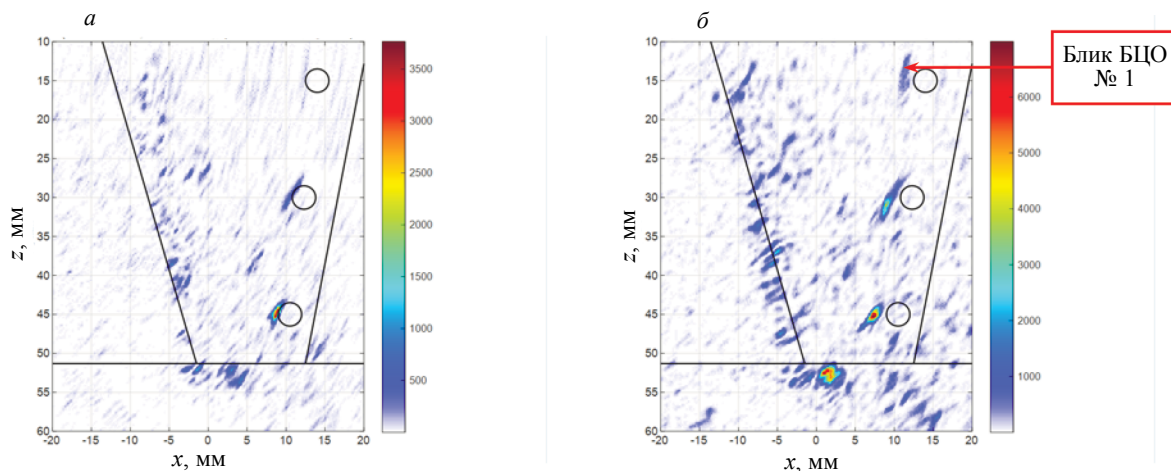


Рис. 12. FMC×CF-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) всего сварного соединения, полученные в режиме тройного сканирования.

3.2.2. Образец композитного сварного соединения трубопровода Ду1100

Образец трубопровода Ду1100 толщиной 64 мм представляет собой композитное сварное соединение, которое хорошо видно на рис. 13, соединяющее трубу из низкоуглеродистой стали и нержавеющей стали. В образце были просверлены три пронумерованных БЦО диаметром 3 мм. Для регистрации эхосигналов использовалась АР с частотой 5 МГц и 64 элементами размером

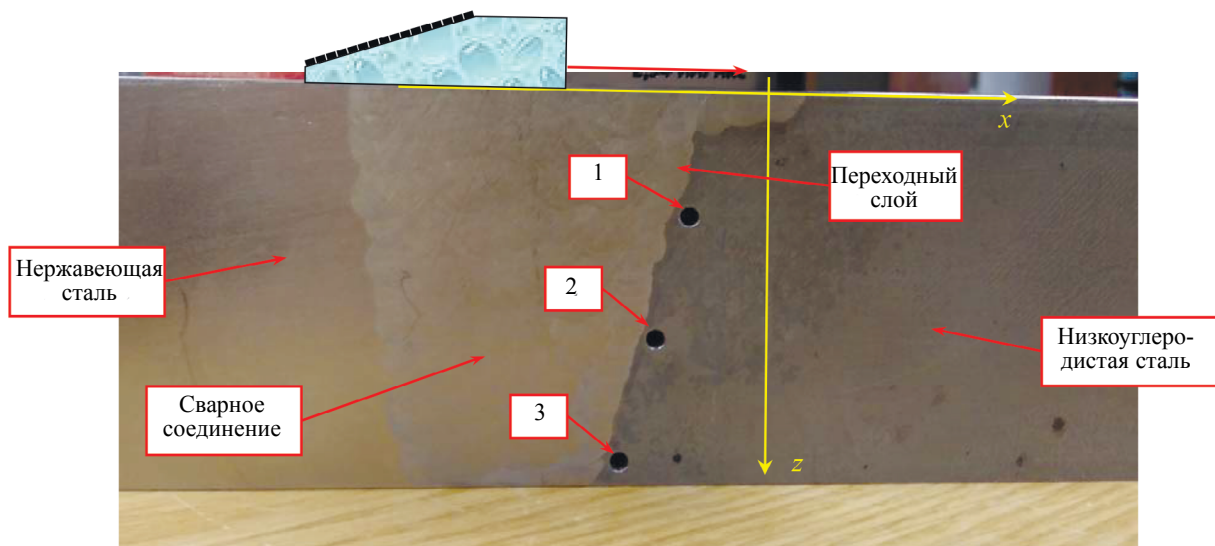


Рис. 13. Образец с композитным сварным соединением трубопровода Ду1100.

0,55 мм с зазором между краями элементов 0,05 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 17 град (стрела 40 мм, пробег в призме 10 мм). Антенная решетка перемещалась по поверхности образца 20 раз с шагом 1 мм (режим тройного сканирования). Стрелки желтого цвета на рис. 13 определяют систему координат, а стрелка красного цвета соответствует области сканирования.

Восстановление блика границы БЦО № 1 не является существенной проблемой, а вот обнаружение БЦО № 2 и особенно БЦО № 3 — это более сложные задачи. При восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным в режиме FMC и PWI, предполагалось, что звук распространяется в трех областях [20]: левая сторона это нержавеющая сталь (скорость продольной и поперечной волны 5,7 и 3,1 мм/мкс, плотность 7900 кг/м³), сварное соединение обладает трансверсальной анизотропией ($C_{11} = 261$, $C_{12} = 99$, $C_{13} = 107$, $C_{33} = 242$, $C_{44} = 89$, $C_{66} = 81$) ГПа, плотность 7900 кг/м³, поворот кристаллических осей –45 град). Правая сторона — это перлитная сталь (скорость продольной и поперечной волны 5,94 и 3,24 мм/мкс, плотность 7800 кг/м³).

На рис. 14 представлено FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б). На изображениях линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 2 и № 3 и границы переходного слоя. На FMC-изображении на фоне структурного шума можно обнаружить БЦО № 2, а блик БЦО № 3 имеет

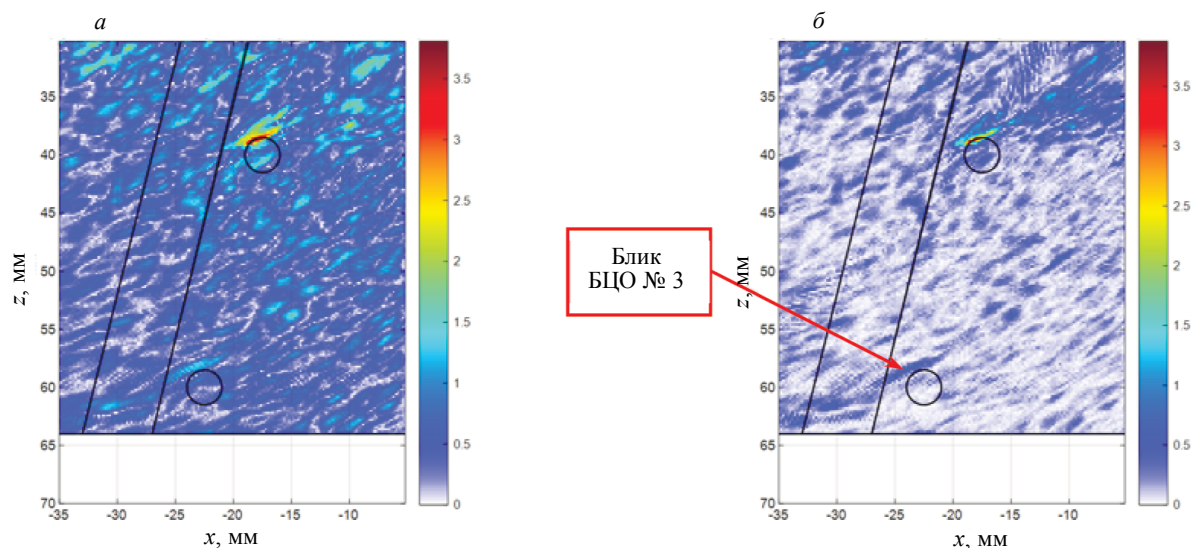


Рис. 14. FMC-изображение (а) и FMC×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 2 и № 3.

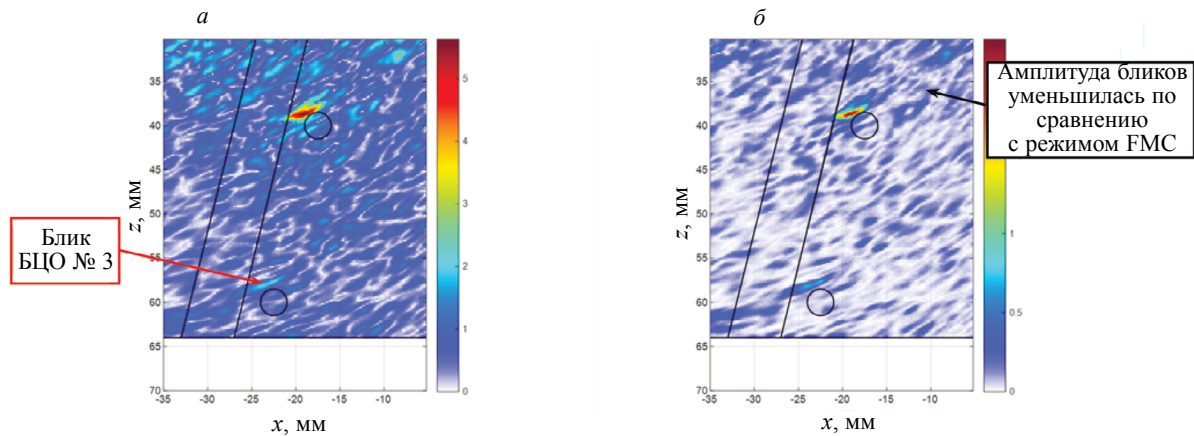


Рис. 15. PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б) блика границы БЦО № 2 и № 3.

амплитуду соразмерную уровню структурного шума. На FMC×CF-изображении уровень шума уменьшился примерно на 10 дБ и блик БЦО № 3 стал более заметен.

На рис. 15 представлено PWI-изображение (а) и PWI×CF-изображение (б). На изображения линиями черного цвета нанесены контуры БЦО № 2 и № 3 и границы переходного слоя. На PWI-изображении блик БЦО № 3 на фоне структурного шума едва заметен. На FMC×CF-изображении уровень шума по сравнению с рис. 15б уменьшился примерно на 10 дБ и блик БЦО № 3 стал более заметен.

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

1. При работе с образцами, имеющими высокое поглощение, режим PWI показывает заметное превосходство над режимом FMC по уровню шума изображения. Например, ОСШ в режиме PWI на 9 дБ выше, чем в режиме FMC (см. рис. 1 и рис. 2).
2. Объединение парциальных изображений как для режима PWI, так и для FMC с использованием когерентного фактора по формулам (3) и (4) позволило повысить ОСШ более чем на 6 дБ, что особенно ценно при работе со сложноструктурными материалами.
3. В режиме PWI по сравнению с режимом FMC удалось повысить ОСШ изображений более чем на 3 дБ (см. рис. 14б и рис. 15б), несмотря на то, что режим PWI изначально не предназначался для работы с образцами с высоким структурным шумом.
4. Так как в режиме PWI использовалось от 15 до 20 плоских волн, то скорость регистрации эхосигналов для 64-элементной АР возросла примерно в 3,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 12.03.2022).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
4. Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // NDT Int. 2006. V. 39. № 7. P. 525—541.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT&E International. 2005. V. 38. P. 701—711.
7. Технология NVIDIA CUDA™. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/technologies/cuda-x/> (дата обращения: 12.03.2022).

8. Угрюмов Е.П. Глава 7. Программируемые логические матрицы, программируемая матричная логика, базовые матричные кристаллы / Цифровая схемотехника. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2. БХВ-Петербург, 2004. С. 357.
9. Stolt R.H. Migration by Fourier transform // *Geophysics*. 1978. V. 43. № 1. P. 23—48.
10. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
11. Montaldo G., Tanter M., Bercoff J., 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.
12. 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 Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2019. V. 66. No. 4. P. 772—788. DOI: 10.1063/1.5031654
13. Jeune L., Robert S., Villaverde E.L., Prada C. Plane Wave Imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging // *Ultrasonics, Elsevier*. 2016. V. 64. P. 128—138. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.08.008
14. 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.]
15. Shevaldykin V.G., Samokrutov A.A. Digital Focusing of Aperture when Probing Test Object by All Elements of Antenna Array in One Emission–Reception Cycle // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022. V. 58. No. 2. P. 81—95. [Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А. Цифровая фокусировка апертуры при зондировании объекта контроля всеми элементами антенной решетки в одном цикле излучение-прием // *Дефектоскопия*. 2022. № 2. С. 13—27.]
16. Jensen J., Stuart M.B., Jensen J.A. Optimized Plane Wave Imaging for Fast and High-Quality Ultrasound Imaging // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2016. V. 63. № 11. P. 1922—1934. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2591980
17. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // *Контроль. Диагностика*. 2015. № 9. С. 10—27.
18. Базулин Е.Г., Евсеев И.В. Уменьшение уровня шума изображения отражателей, восстановленного по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой / Россия, Москва, «XXVII международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, 11-12 марта 2021 г. С. 303.
19. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 12.03.2022).
20. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // *Дефектоскопия*. 2015. № 4. С. 42—52.