

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА ТИПА ДУ800. ЧАСТЬ 2. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ

Е.Г. Базулин

В первой части статьи показано, что для восстановления высококачественного изображения отражателей в сварном соединении трубопровода типа Ду800 недостаточно применение метода ЦФА в варианте, рассчитанном на распространение ультразвука в однородной изотропной среде. Для дополнительного повышения качества изображения в методе ЦФА необходимо: определять упругие свойства наплавки трубопровода Ду800 и учитывать ее анизотропию при распространении ультразвука, а также профиль поверхности. Для повышения разрешающей способности и уменьшения уровня шума были применены методы ЦФА-У и максимальной энтропии (МЭ). Сравнение результатов ультразвукового и рентгеновского контролей позволило сделать вывод, что первый из них более информативен для обнаружения трещиноподобных отражателей.

Ключевые слова: акустическая дефектометрия, антенная решетка, двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), тройное сканирование, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), метод максимальной энтропии (МЭ).

1. ВВЕДЕНИЕ

В первой части статьи [1] было показано, что для восстановления высококачественного изображения отражателей в сварном соединении трубопровода типа Ду800 недостаточно применение метода ЦФА в варианте, рассчитанном на распространение ультразвука в однородной изотропной среде. Поэтому для повышения качества изображения отражателей в образце трубопровода диаметром 840 мм (тип Ду800) со сварным соединением использовали следующие дополнительные приемы:

- 1) трехмерную обработку эхосигналов (метод ЦФА-У);
- 2) восстановление трехмерных изображений отражателей по эхосигналам методом максимальной энтропии (МЭ);
- 3) определение упругих свойств наплавки и учет ее анизотропии при восстановлении изображения отражателей, в частности, по схеме с отражением импульсов от дна;
- 4) определение формы поверхности и учет ее в алгоритмах семейства ЦФА.

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТРАЖАТЕЛЕЙ

2.1. Метод максимальной энтропии

Как правило, обратные задачи являются некорректными. Для их решения в [2] был разработан метод регуляризации, обосновывающий замену задачи в форме (формула (2) [1]) на задачу оптимизации, устойчивой к малым изменениям входных данных p

$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_x \cdot N_t}} (\chi^2(\hat{\varepsilon}) + \alpha \Omega(\hat{\varepsilon})),$$

где $\chi^2(\varepsilon) = \|P(\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}, t)) - p(\mathbf{r}, t)\|^2$ — квадрат невязки решения в метрике, определяемой спецификой задачи; $\Omega(\varepsilon)$ — стабилизирующий функционал. Применяя в качестве стабилизирующего функционала энтропию, формулу (1) можно переписать в виде

$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_x \cdot N_t}} (\chi^2(\hat{\varepsilon}) - \alpha H(\hat{\varepsilon})),$$

где $H(\hat{\varepsilon})$ — энтропия набора дискретных независимых случайных величин, которая определяется для случая действительных, неотрицательных $\hat{\varepsilon}_i$ как

$$H(\hat{\varepsilon}) = - \sum_{i=1}^{N_{i,x}N_{i,z}} \hat{\varepsilon}_i \ln \hat{\varepsilon}_i = -\Omega(\hat{\varepsilon}),$$

где $N_{i,x}N_{i,z}$ — число точек в восстанавливаемом изображении вдоль осей x и z . На практике часто применяют, так называемую, кросс-энтропию [3]

$$H(\hat{\varepsilon}) = - \sum_{i=1}^{N_{i,x}N_{i,z}} \hat{\varepsilon}_i \ln \frac{\hat{\varepsilon}_i}{m_i},$$

где m — априорная модель или оценка вида решения ε . В качестве простейшей модели можно использовать постоянную величину μ , которая понимается как оценка среднего значения интенсивности фона изображения. В данной работе энтропия знакопеременной функции $\hat{\varepsilon}$ рассчитана по формуле [4]

$$z_i = \sqrt{\hat{\varepsilon}_i^2 - 4\mu^2},$$

$$H_{\pm}(\hat{\varepsilon}) = - \sum_{i=1}^{N_{i,x}N_{i,z}} \left(z_i - 2\mu - \varepsilon_i \ln \frac{z_i + \varepsilon_i}{2\mu} \right).$$

Вид градиента и Гессиана выражения приведен в [5].

2.1.1. Выбор коэффициента Лагранжа и значение уровня фона

Основной методической проблемой применения метода МЭ являются выбор значения фоновой амплитуды μ и параметра регуляризации α . Существуют точные и эмпирические способы выбора параметра регуляризации: методы невязки [2,6] и перекрестной проверки [7], задача обобщенной минимизации [8], методы L -кривой [9], адаптивный [10] и другие. Однако одни методы являются итерационными и поэтому требуют значительных вычислительных ресурсов, а для других необходима дополнительная информация, например, значение дисперсии шума $\sigma(n)$, которая не всегда может быть оценена с достаточной точностью. Авторы [11] после проведения множества численных экспериментов просто составили таблицу, связывающую α с величиной дисперсии шума $\sigma(n)$. Однако во многих практических работах, посвященных применению метода МЭ, задача решается для множества коэффициентов Лагранжа α , а из набора полученных оценок $\hat{\varepsilon}_{\alpha}$ выбирается лучшее решение согласно заданному критерию. В данной статье для выбора коэффициента Лагранжа α при заданном значении μ применили критерий L -кривой.

2.1.2. Требуемые вычислительные ресурсы для расчетов методом МЭ

Для получения изображения порядка 256×160 пикселей нужно работать с матрицами порядка $40\,000 \times 40\,000$ элементов. При использовании формата двойной точности для расчетов методом МЭ потребуется 128 Гбайт оперативной памяти. Для 12 процессоров время выполнения операций приведено в таблице.

Т а б л и ц а

Время выполнения различных операций методом МЭ для получения изображения 256×160 пикселей

№ п/п	Операция	Время	Комментарий
1	Расчет матрицы G	70 с	Можно ускорить на два порядка при использовании технологии CUDA Самая «тяжелая» операция для ускорения, так как надо сделать около 10^{13} операций
2	Транспонирование матрицы G	11 с	
3	Нахождение Гессиана	2 420 с	
4	Изображение как корреляция (формула (5) [1])	1,5 с	
5	Метод МЭ по формуле	Несколько мин	

При расчете матрицы G за счет распараллеливания вычисления ее элементов можно достичь ускорения расчетов на два порядка, используя графические карты с технологией NVIDIA CUDA™ [12]. Если перевести формат чисел матрицы в целый вид, то требования к объему памяти можно уменьшить на порядок. Если заняться оптимизацией программного кода алгоритма, то можно ожидать дополнительного ускорения расчетов в два-три раза. Можно, наконец, применять методы оптимизации первого порядка, что позволит отказаться от расчета и использования Гессiana и существенно уменьшить время проведения расчетов по строке 3 (см. таблицу).

2.2. Учет неровной поверхности объекта контроля

Как показано в [13,14], если неровность поверхности объекта контроля превышает половину длины волны на центральной частоте антенной решетки, то изображение отражателей, восстановленное методом ЦФА, может сильно исказиться. Если профиль поверхности известен, то его можно учесть в методе ЦФА и существенно повысить качество изображения отражателей. Применение локальной иммерсионной ванны позволит по измеренным эхосигналам на первом этапе восстановить изображение поверхности объекта контроля, по которому можно получить ее профиль (см. раздел 3.5). На втором этапе, используя информацию о профиле поверхности, ее влияние можно учесть в методах семейства ЦФА и получить изображение отражателей, практически свободное от искажений.

2.3. Учет анизотропии в наплавке объекта контроля

В [15] показано, что анизотропия в наплавке толщиной всего 5 мм приводит к существенному искажению изображения отражателей при использовании метода ЦФА, не учитывающего наличие в объекте контроля нескольких областей с разными акустическими свойствами. Применение метода трассировки для оценки времени распространения импульса по лучу позволяет учесть влияние анизотропии [16] и получить изображение отражателей методом ЦФА с более высокой фокусировкой. Восстановленный образ отражателя будет точнее соответствовать его реальной форме.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготавливаемого в ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+» и они описаны в первой части статьи [1]. Важно отметить, что для получения результатов, изложенных в этой статье (за исключением результатов в разделе 3.5), новые измерения не проводили, а обрабатывали ранее зарегистрированные эхосигналы.

3.1. Трехмерная обработка эхосигналов (ЦФА-У)

Обработка измеренных эхосигналов методом ЦФА-У [1] по акустической схеме TdT не привела к заметному повышению фронтальной разрешающей способности в дополнительной плоскости. Дело в том, что размеры элементов используемой антенной решетки в направлении оси u равны 10 мм, а расстояния, на которых восстанавливались изображения, не превышали 100 мм. Поэтому ультразвуковое поле не успевало существенно разойтись в дополнительной плоскости призмы и антенной решетки. Для эффективной работы метода ЦФА-У нужно использовать антенные решетки с размерами элементов вдоль оси u меньше 5 мм. Поле такого элемента в условиях модельного эксперимента будет иметь ширину диаграммы направленности в дополнительной плоскости более 10 град при размере ближней зоны около 10 мм. В этом случае восстановленное изображение будет иметь разрешающую способность вдоль оси u , равную примерно 5 мм. Использование антенных матриц для излучения и приема ультразвуковых импульсов позволит еще больше повысить разрешающую способность изображения отражателей вдоль оси u .

3.1.1. Акустическая схема LdL, отражатели 3 и 4

Преимущества метода ЦФА-У при обработке эхосигналов, измеренных с применением антенных решеток с размерами элементов $0,9 \times 10$ мм, можно заметить при использовании продольной волны. На рис.1 показаны ЦФА-изображения D -типа, свернутые по максимуму для NP -канала по акустической схеме LdL : слева — восстановленное в режиме ЦФА, а справа — в режиме ЦФА-У.

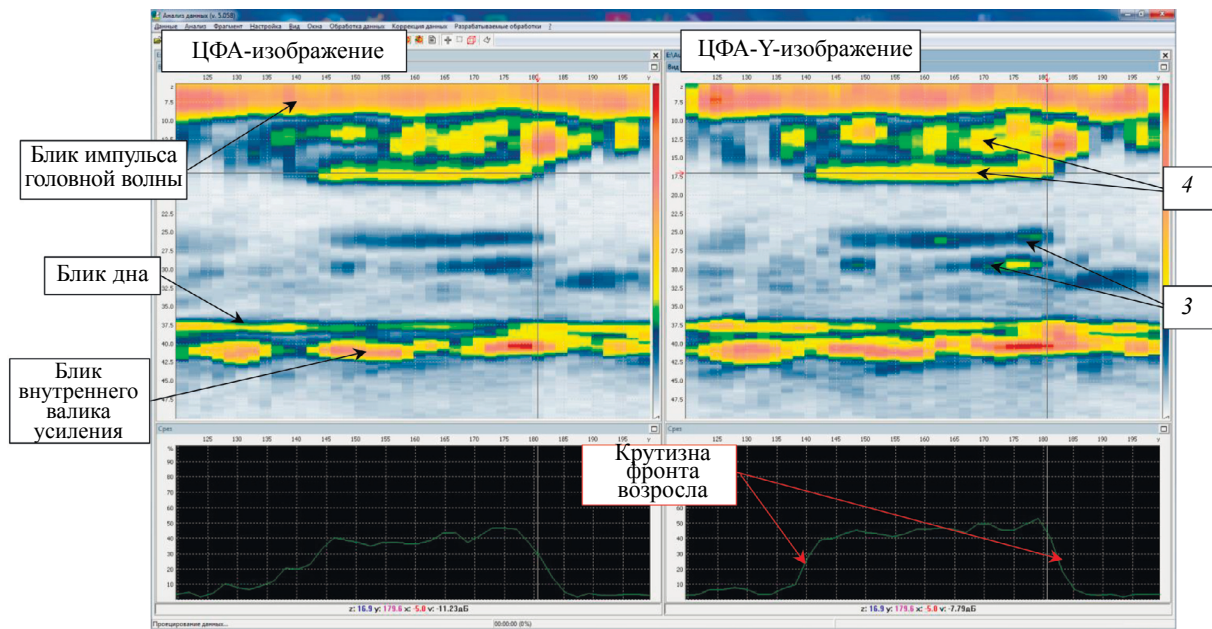


Рис. 1. Изображения D -типа, свернутые по максимуму для NP -канала по акустической схеме LdL : слева — ЦФА-изображение; справа — ЦФА- Y -изображение.

Повышение фронтальной разрешающей способности примерно в полтора раза хорошо заметно по крутизне фронта на срезе изображения D -типа при $z = 16,9$ мм. На обоих изображениях хорошо виден блик, сформированный импульсом головной волны, который распространяется, несмотря на 35-градусный угол наклона призмы. В отличие от ЦФА-изображения на рис. 9 [1], полученного по схеме TdT , на рис.1 хорошо виден блик верхней границы отражателя 4.

3.2. Применение метода МЭ, отражатели 3 и 4

В данном разделе обрабатывали эхосигналы для пятого положения антенных решеток при их перемещении вдоль оси x (см. раздел 3 [1]). В этом положении антенные решетки с N - и P -стороны находятся примерно на одинаковых расстояниях от центра шва. Контрастность изображений рисунков данного раздела увеличена на 6 дБ.

3.2.1. Изображения по N -каналу

На рис. 2 слева показано изображение, восстановленное методом ЦФА, а справа — методом МЭ. Видно, что лучевая и фронтальная разрешающие способности МЭ-изображения повысились более чем в два раза. Однако в МЭ-изображении ухудшился динамический диапазон, так как блики малой амплитуды на МЭ-изображении либо уменьшили свою амплитуду в сравнении с ЦФА-изображением, либо практически исчезли. На изображения B -типа нанесены контуры пазов 3 и 4 так, чтобы они совпали с бликами соответствующим углам пазов, так как их реальная форма точно неизвестна. Очень важно то обстоятельство, что при восстановлении МЭ-изображения использовалось около 10 % эхосигналов, по которым формировалось ЦФА-изображение. В правом нижнем углу рис. 2 приведен увеличенный фрагмент изображения B -типа блика угла наплавки (см. рис. 3 [1]). Если оценивать его фронтальные размеры по ЦФА-изображению, то получаем величину 1,7 мм, а по МЭ-изображению — 0,8 мм.

3.2.2. Изображения по P -каналу

На рис. 3 слева показано ЦФА-изображение, а справа — МЭ-изображение. Лучевая и фронтальная разрешающие способности МЭ-изображения повысились более чем в два раза. Как и в разделе 3.2.1 амплитуды бликов МЭ-изображения существенно изменились. На изображения B -типа нанесены контуры пазов 3 и 4 в таком виде, в каком они определены на рис. 2 Видно, что

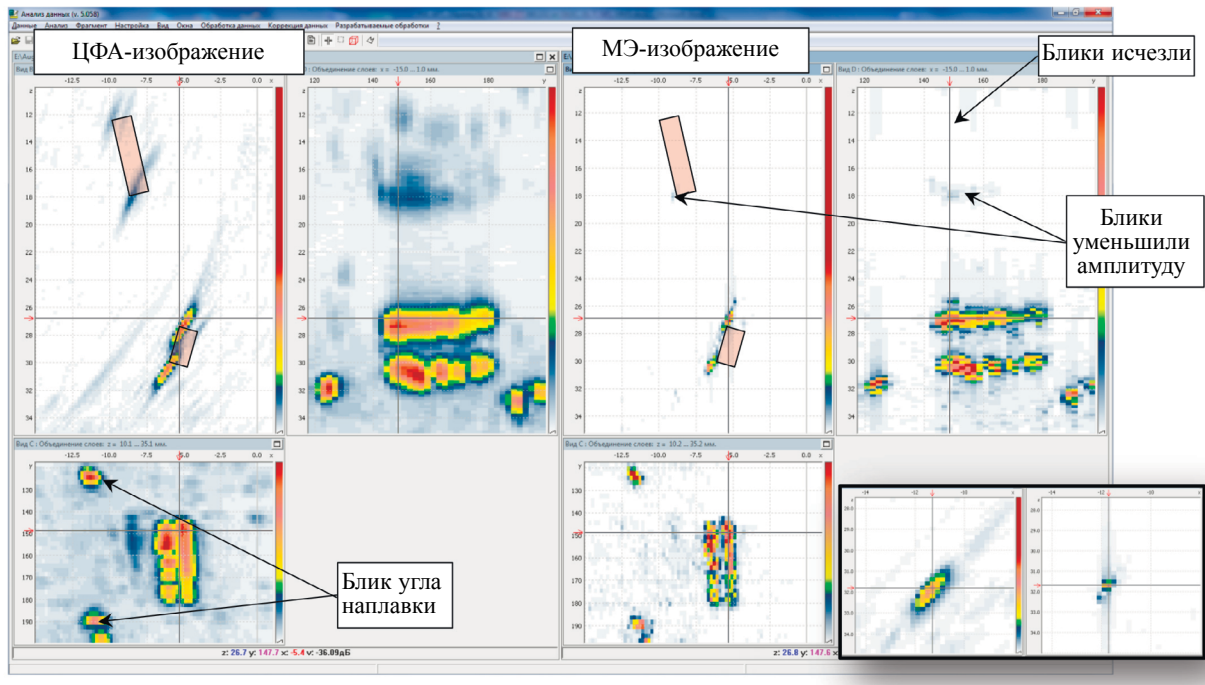


Рис. 2. ЦФА- и МЭ-изображения для N -стороны для акустической схемы **TdT**. Изображения D - и C -типов объединены по максимуму.

положение бликов отражателя 4, восстановленные с P -стороны, заметно отличаются от контуров пазов. Это можно объяснить тем, что: во-первых, поверхность образца неровная (см. рис. 2 [1]); во-вторых, скорость звука основного металла с P -стороны может отличаться от скорости основного металла с N -стороны; в-третьих, сварное соединение может вносить дополнительные искажения из-за своих особых акустических свойств. По изображению D -типа можно предположить, что верхняя граница паза 4 неровная, несмотря на то, что она является фрезерованной.

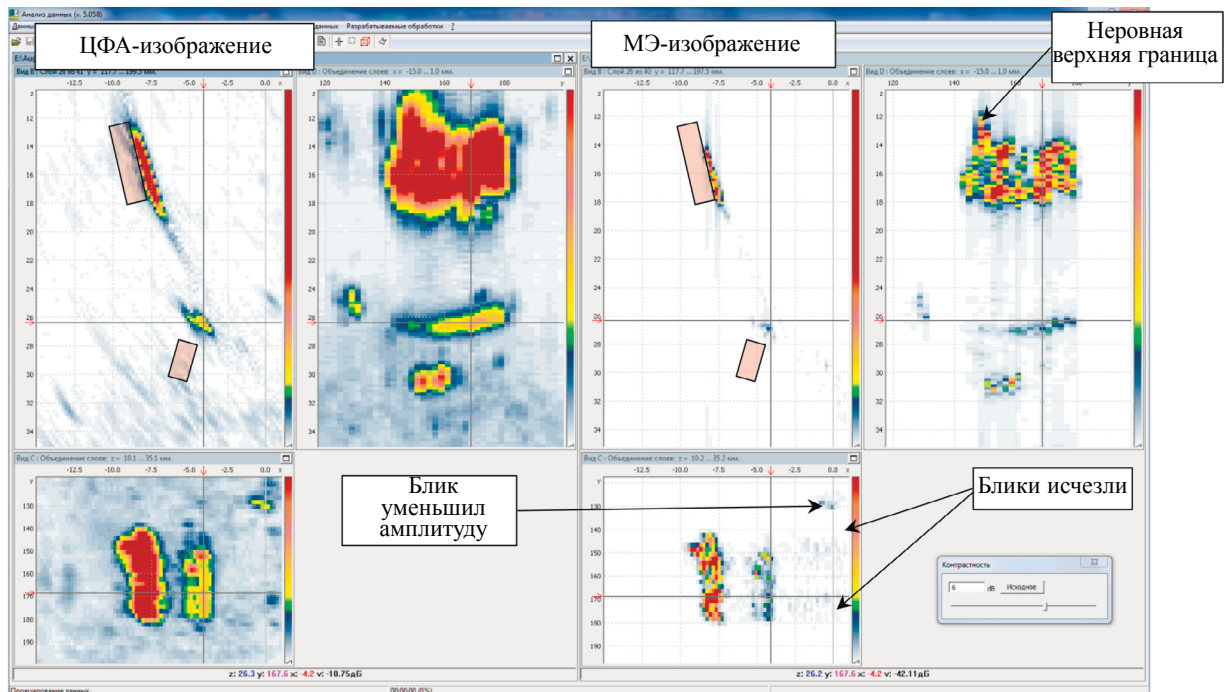


Рис. 3. ЦФА- и МЭ-изображения для P -стороны для акустической схемы **TdT**. Изображения D - и C -типов объединены по максимуму.

3.2.3. Изображения по NP-каналу

На рис. 4 слева показано ЦФА-изображение, а справа — МЭ-изображение. Лучевая и фронтальная разрешающие способности МЭ-изображения повысились более чем в два раза. Как и раньше динамический диапазон МЭ-изображения ухудшился по сравнению с ЦФА-изображением. На изображения *B*-типа нанесены контуры пазов 3 и 4 в таком виде, в каком они определены на рис. 2. Видно, что блики изображений, восстановленных с *P*-стороны, заметно отличаются от контуров пазов. Возможное объяснение этого эффекта предложено в разделе 3.2.2.

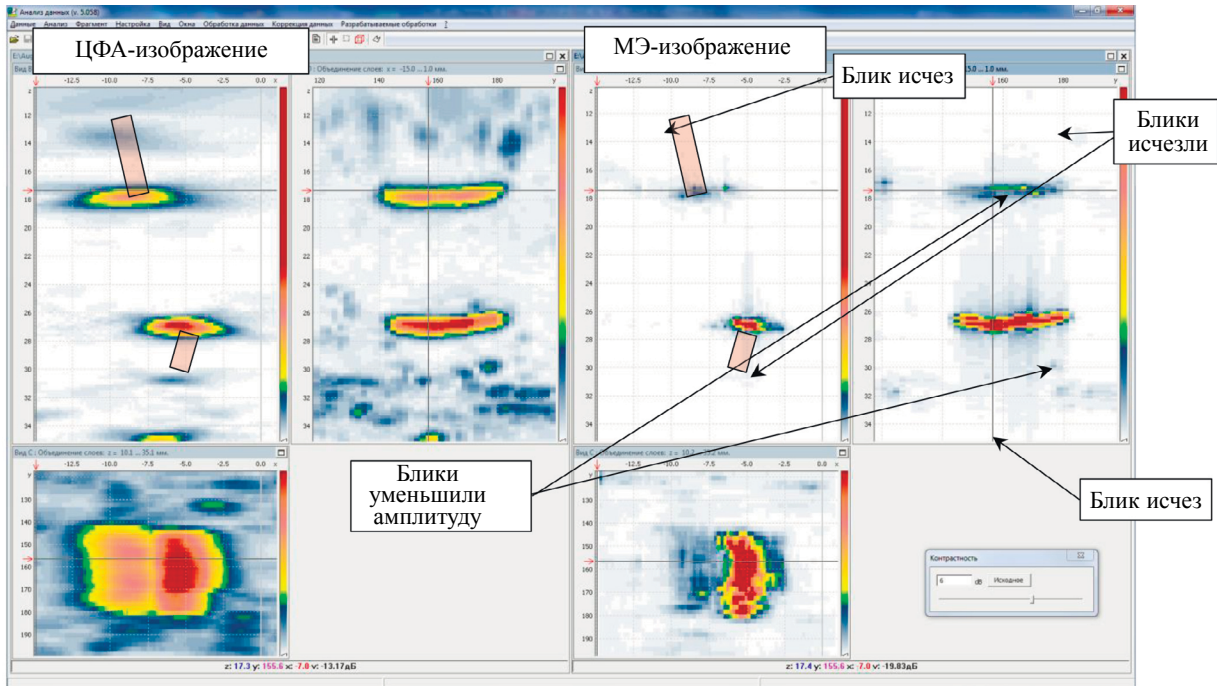


Рис. 4. ЦФА- и МЭ-изображения для *NP*-стороны для акустической схемы **TdT**. Изображения *D*- и *C*-типов объединены по максимуму.

3.2.4. Объединенные изображения по *N*-, *P*- и *NP*-каналам

На рис. 5 слева показано изображение, восстановленное методом ЦФА, а справа — методом МЭ (формула (11) [1]). Как и раньше лучевая и фронтальная разрешающие способности МЭ-изображения повысились более чем в два раза, но уменьшился динамический диапазон (см. рис. 2—4). На изображения *B*-типа нанесены контуры пазов 3 и 4, на которых отлично видны верхние и нижние границы пазов 3 и 4 в отличие от изображений, восстановленных отдельно по каналам.

3.3. Учет неоднородных свойств наплавки

3.3.1. Изображения по *P*-каналу, отражатель 5

На рис. 6 слева показано ЦФА-изображение придонного паза (отражатель 5), восстановленное по трем акустическим схемам $L_{as} = \{TdT, TdTrbT, TrbTdTrbT\}$, в предположении, что в однородном образце скорости звуков продольной и поперечной волн равны 5,95 и 3,23 мм/мкс. Изображения *D*- и *C*-типа свернуты по максимуму. Наплавка обладает ярко выраженными аустенитными свойствами: блик корня паза смещен вправо на 1 мм относительно блика его правого верхнего угла. На изображение *B*-типа линиями красного цвета нанесены контуры паза и наплавки, а на изображении *D*-типа паз показан прямоугольником с границей черного цвета и розовой полупрозрачной заливкой. Изменяя при восстановлении изображения параметры упругих свойств наплавки, можно добиться совмещения бликов с их ожидаемыми положениями для продольной и поперечной волн. Коэффициенты упругости, при которых на восстановленных изображениях

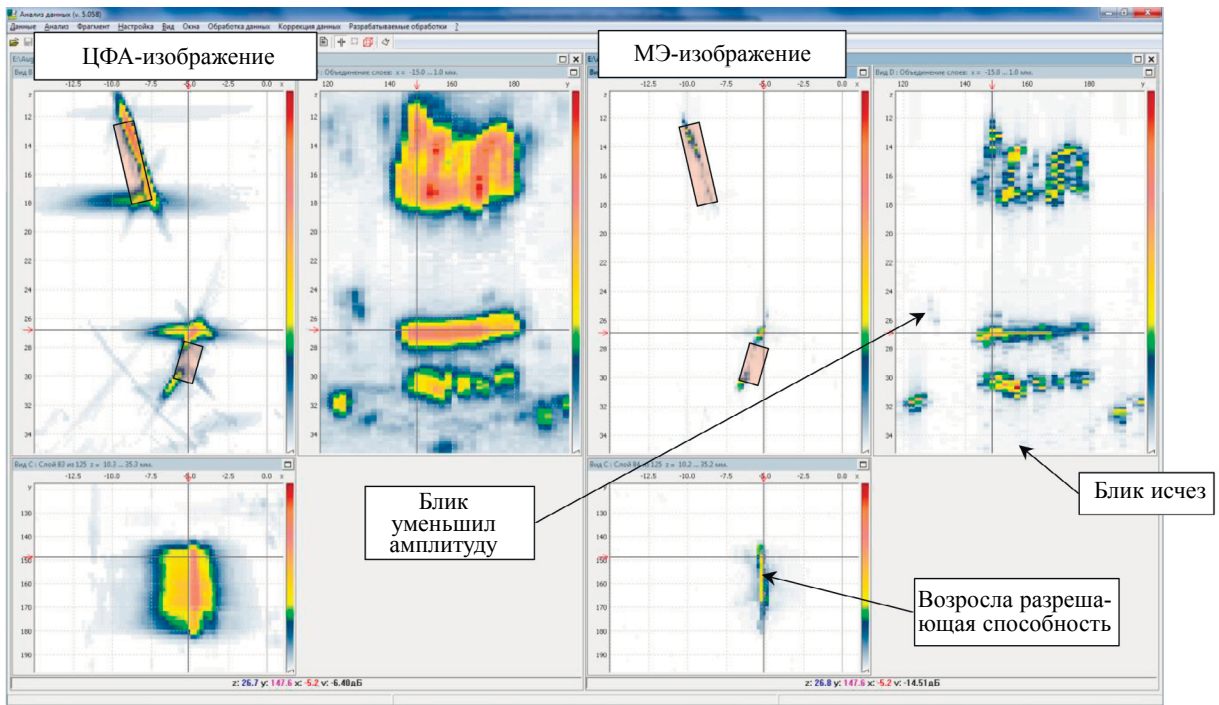


Рис. 5. ЦФА- и МЭ-изображения, объединенные в виде суммы изображений для N -, P - и NP -каналов (акустическая схема TdT). Изображения D - и C -типов объединены по максимуму.

блики корня на акустических схемах LdL и TdT совпадут, и будут находиться под бликом верхнего правого угла паза, можно считать решением задачи определения упругих свойств наплавки. На рис. 6 справа показано изображение, восстановленное по трем акустическим схемам с учетом наличия наплавки толщиной 4 мм, обладающей кубической симметрией со следующими свойства-

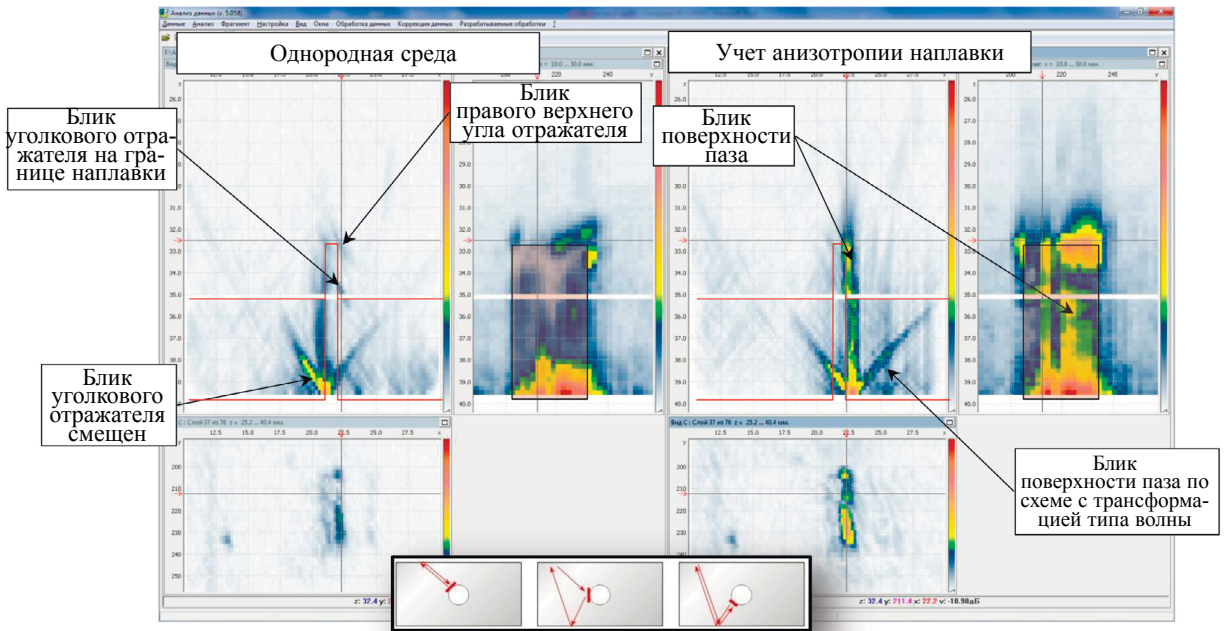


Рис. 6. ЦФА-изображения придонного паза (отражатель 5) без учета анизотропной наплавки (слева) и с учетом — (справа). Изображения D - и C -типов свернуты по максимуму. Пиктограммы трех акустических схем, используемых для восстановления, показаны внизу рисунка.

ми: упругие константы ($c_{11} = 302$, $c_{12} = 198$, $c_{44} = 88$) ГПа, плотность 7800 кг/м^3 , угол поворота кристаллических осей 0 град. Справа хорошо видна правая вертикальная граница паза, в отличие от изображения слева.

3.3.2. Изображения по P -каналу, отражатель 2

На рис. 7 в верхнем ряду показаны ЦФА-изображения паза (отражатель 2), восстановленные в предположении, что образец состоит из однородного материала, а в нижнем ряду — с учетом наличия наплавки с анизотропными свойствами, определенными в разделе 3.3.1. Самое точное соответствие бликов правым углом паза должно быть при восстановлении изображения по акустической схеме **TdT** в предположении, что в однородном образце скорости звуков продольной и поперечной волн равны $5,95$ и $3,23 \text{ мм/мкс}$ (рис. 7, вверху слева). По этому изображению происходила привязка маски, показанная на изображениях B - и D -типов прямоугольниками с границами черного цвета и розовой полупрозрачной заливкой. Блик правой поверхности паза на изображении, полученном по схеме **TdTrbT**, оказался смещенным влево примерно на 2 мм (рис. 7, вверху справа). Однако несмотря на его смещение, форма блика позволяет предположить, что обнаружен плоскостной отражатель. Учет анизотропных свойств наплавки позволяет восстановить изображение по схеме **TdTrbT**, на котором блик паза не смещен по оси x , имеет лучшую фокусировку, но смещен по глубине вверх примерно на 2 мм . Изображение, восстановленное по акустической схеме **LdLrbL** (рис. 7, внизу справа), добавляет уверенности, что обнаружен плоскостной отражатель. Блик правой границы паза смещен вправо примерно на 1 мм . Полагаю, что это смещение связано с тем, что параметры анизотропии наплавки определены недостаточно точно или изменились в другом месте шва.

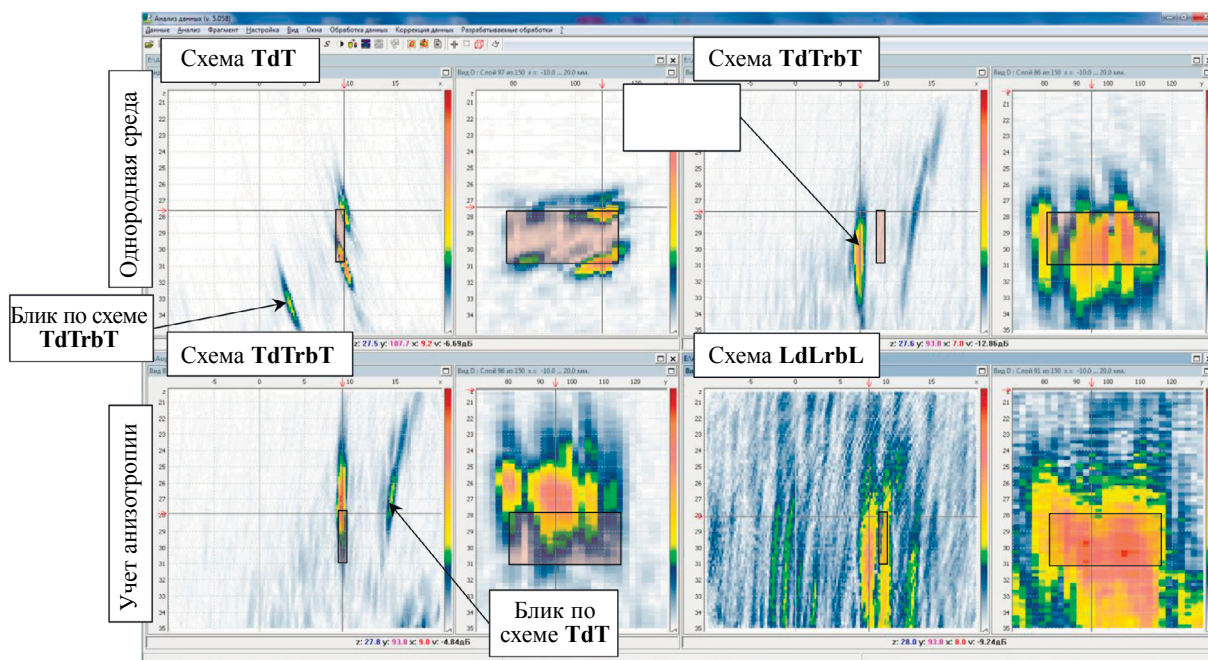


Рис. 7. ЦФА-изображения паза (отражатель 2) без учета анизотропной наплавки (ряд вверху) и с учетом — (ряд внизу).

3.4. Изображения по NP -каналу отражателей 3 и 4 с учетом головной и боковой волн

Анализ измеренных эхосигналов показал, что зарегистрированы импульсы, распространяющиеся при излучении как головная волна под поверхностью образца с излучением боковой волны, и приемом на поперечной волне (акустическая схема **LrsTdT**). На рис. 8 слева показано ЦФА-изображение по акустической схеме **TdT**, а справа — по акустической схеме **LrsTdT**. Для используемой конфигурации излучения и приема эхосигналов, рассеянных отражателями 3 и 4, сложно утверждать, что получена новая информация: блики верхнего паза практически не видны по акустической схеме **LrsTdT**. Изображения скорее демонстрируют как возможности

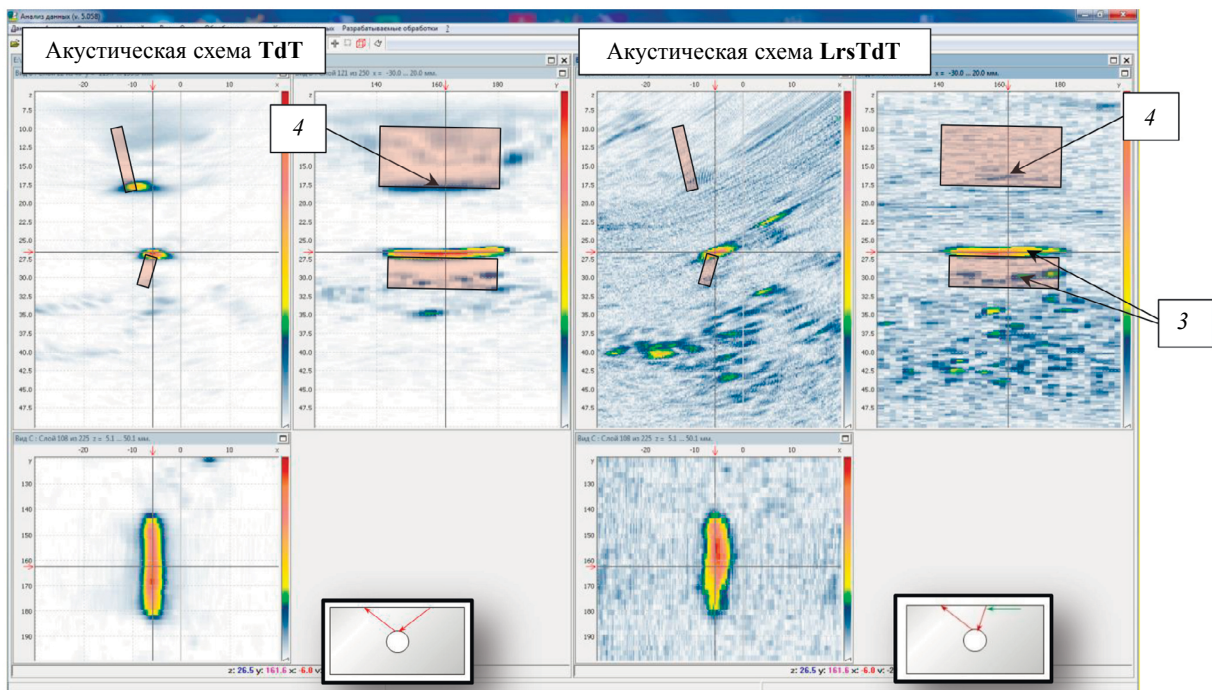


Рис. 8. Слева показано ЦФА-изображение, восстановленное по акустической схеме TdT, справа — LrsTdT. Их пиктограммы приведены внизу рисунка.

метода ЦФА, так и то, что акустическая схема LrsTdT на головной и боковой волнах может оказаться полезной для каких-то конкретных объектов контроля.

3.5. Дополнительный модельный эксперимент. Учет неровной поверхности объекта контроля

В дополнение к измерениям двумя антенными решетками [1] (для учета в методе ЦФА неровной поверхности объекта контроля) были проведены измерения с использованием антенной решетки (5 МГц, 64 элемента, размер пьезоэлемента $0,55 \times 10$ мм, зазор 0,05 мм) фирмы IMASONIC. Для создания локальной иммерсионной ванны из воды использовался адаптивный протектор (рис. 9),

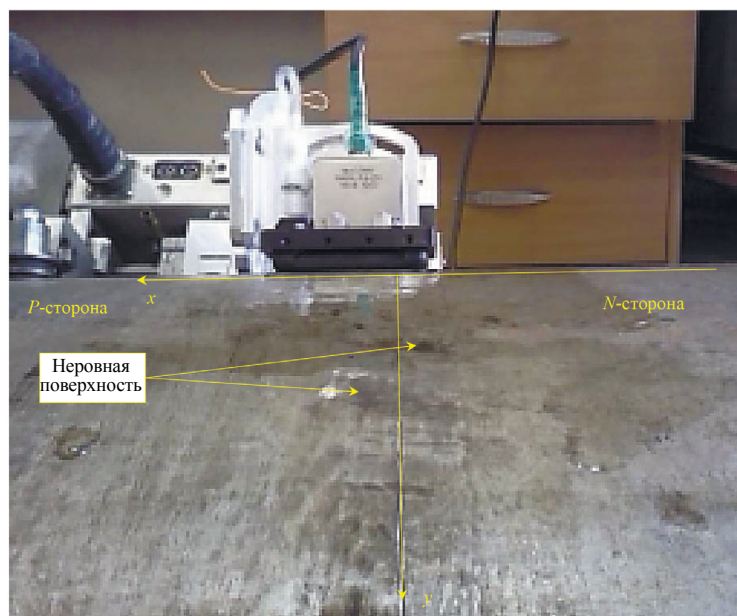


Рис. 9. Проведение измерений с помощью адаптивного протектора.

резиноподобный материал которого позволял облегать неровности поверхности. Как отмечалось в первой части статьи (см. рис. 3 [1]), координаты z внешней поверхности слева и справа от сварного соединения отличаются примерно на 1 мм, а на рис. 9 и 4 [1] видно, что на поверхности имеются неровности высотой около 0,5 мм, возникшие при подготовке объекта к контролю. Антенную решетку перемещали 150 раз с шагом $2 \pm 0,05$ мм по оси y и 9 раз — с шагом $4,96 \pm 0,05$ мм по оси x . Применение адаптивного протектора позволяет восстанавливать ЦФА-Х-изображения в неограниченной области вдоль оси x (см. раздел 2.2). В данном конкретном примере изображения восстановлены в интервале вдоль оси $x \pm 55$ мм.

На рис. 10 показаны ЦФА-Х-изображения по акустической схеме **LdL** отражателей 3 и 4: слева — без учета неровной поверхности образца, а справа — с учетом. Прямоугольниками с границами черного цвета и розовой полупрозрачной заливкой показаны контуры отражателей. Если полагать, что поверхность образца ровная, то блик верхнего края отражателя 3 оказался расфокусированным и смещенным вверх примерно на 1,5 мм. Блики границы отражателя 4 тоже оказались смещенными от своих истинных положений, а блик поверхности отражателя 4, сформированный по эхосигналам, измеренным в самом левом положении антенной решетки, смещен примерно на 5 мм вниз и на 2 мм вправо. После учета в методе ЦФА-Х неровной поверхности образца удалось получить компактный блик верхней поверхности отражателя 3 шириной около 1 мм, а блик поверхности отражателя 4 после учета профиля поверхности сфокусировался в нужном месте, поэтому можно уверенно утверждать, что обнаружена трещина. На обоих изображениях видна граница наплавки — основной металл и дно с валиком усиления и несколько незаложенных отражателей. Контрастность изображений увеличена на 6 дБ.

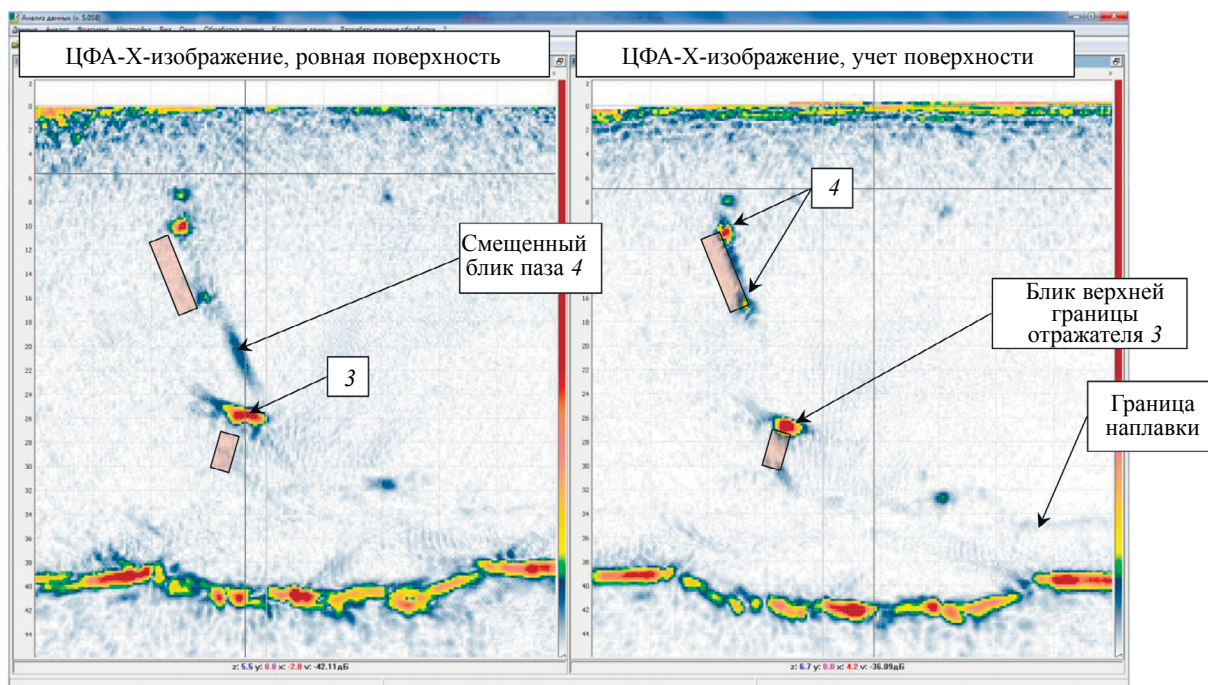


Рис. 10. ЦФА-Х-изображения отражателей 3 и 4 по акустической схеме **LdL**: слева — без учета неровной поверхности; справа — с учетом.

На рис. 11 слева показано ЦФА-Х-изображение придонного пропила высотой 7 мм, выполненного фрезой шириной 1 мм (отражатель 5) без учета неровной поверхности. Несмотря на то что изменения профиля поверхности меньше 1 мм, блик верхней грани отражателя 5 раздвоился. На изображение линиями черного цвета нанесены контуры паза и наплавки. После учета в методе ЦФА-Х неровной поверхности образца удалось получить компактный блик верхней грани паза, ширина которого равна примерно 1 мм (см. рис. 11 справа). На обоих изображениях видны граница наплавки — основной металл и дно с валиком усиления и несколько незаложенных отражателей. Контрастность изображений увеличена на 6 дБ.

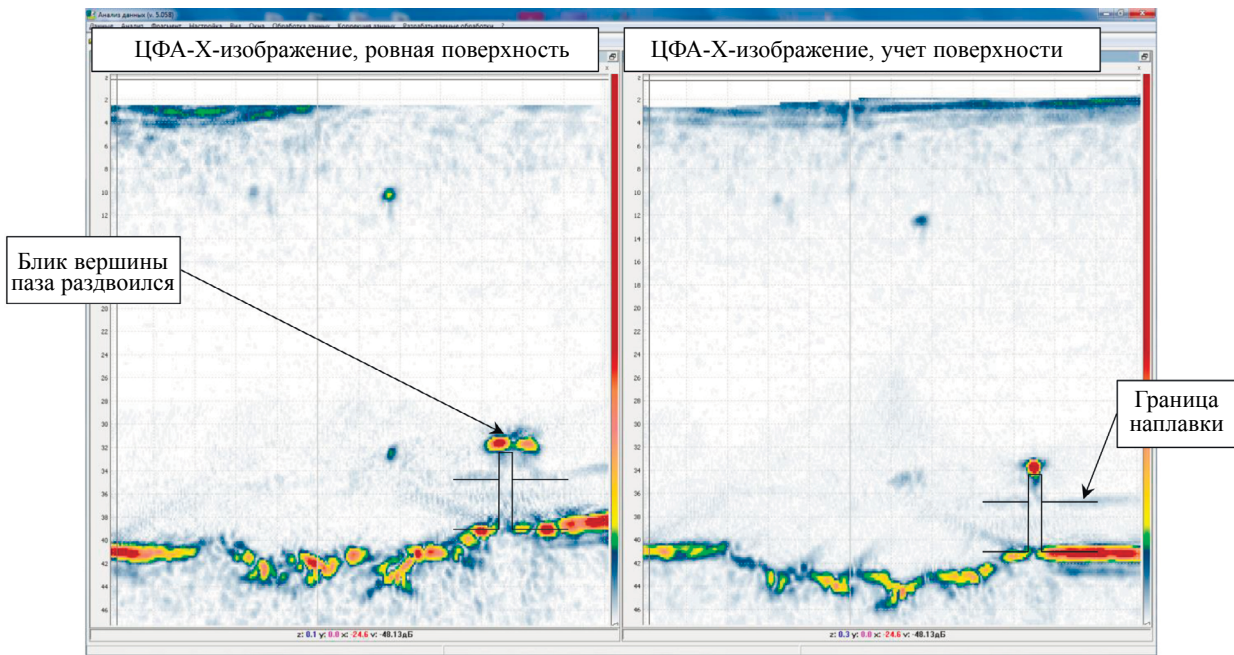


Рис. 11. ЦФА-Х-изображения придонного паза (отрагатель 5) по акустической схеме LdL: слева — без учета неровной поверхности, а справа — с учетом.

На рис. 12 показаны свернутые по максимуму изображения D -типа по акустической схеме LdL: слева — ЦФА-Х-изображение, а справа — ЦФА-изображение. При восстановлении изображений учитывалась неровная граница поверхности образца. На левое изображение прямоугольниками с границами черного цвета и розовой полупрозрачной заливкой наброшены контуры отражателей. Качество ЦФА-Х-изображения примерно такое же, что и ЦФА-изображения. На изображениях

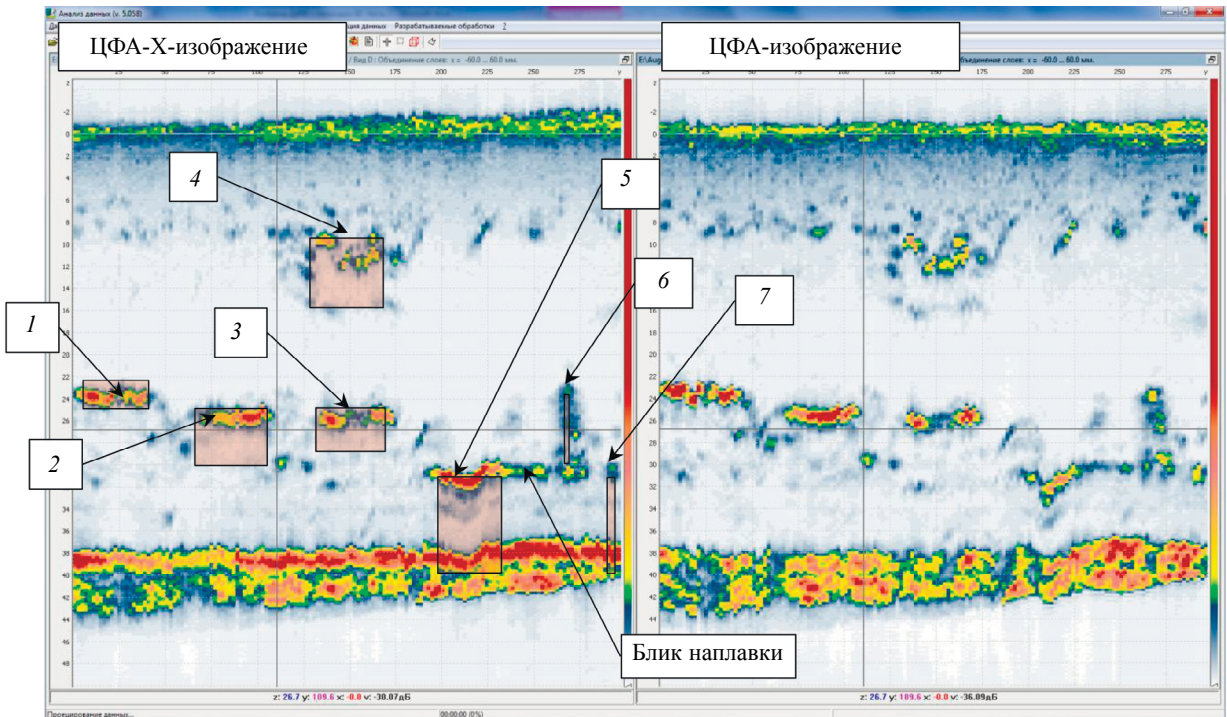


Рис. 12. Свернутые по максимуму изображения D -типа по акустической схеме LdL: слева — ЦФА-Х-изображение; справа — ЦФА-изображение.

хорошо видны блики верхних границ отражателей, а блик нижней границы заметен только для отражателя 4. Это связано с тем, что в данном модельном эксперименте использовали протектор для ввода ультразвука под углом около нуля градусов. Отметим, что применение двух антенных решеток и работа по акустической схеме **TdT**, позволили обнаружить блики верхней и нижней границ отражателей (см. рис. 13 или 15 [1]). Полагаю, что подобного результата можно добиться используя другие адаптивные протекторы, входящие в комплект поставки и предназначенные для ввода ультразвуковых импульсов в объект контроля в широком диапазоне углов как для продольной, так и для поперечной волн.

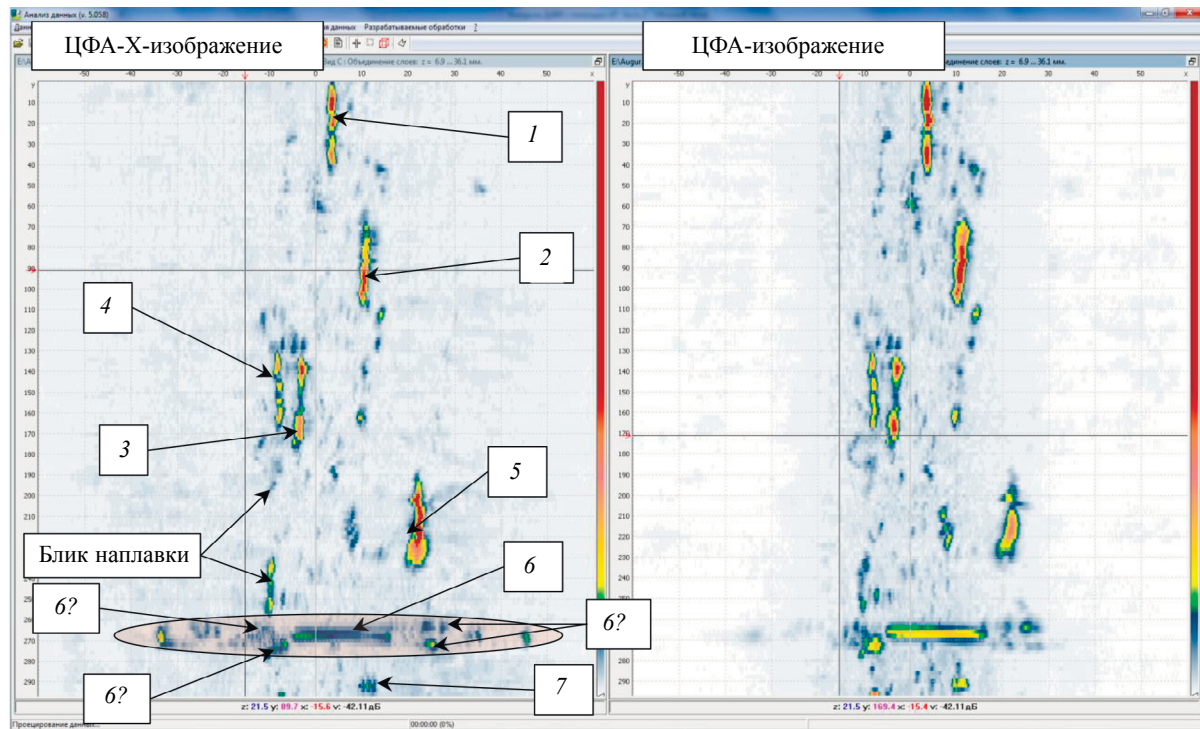


Рис. 13. Свернутое по максимуму изображения С-типа по акустической схеме **LdL**: слева — ЦФА-Х-изображение; справа — ЦФА-изображение.

На рис. 13 слева показано свернутое по максимуму ЦФА-Х-изображение С-типа для акустической схемы **LdL**, а справа — ЦФА-изображение. Качество ЦФА-Х-изображения выше, чем ЦФА-изображения, так как, во-первых, возросла разрешающая способность вдоль оси *x*, во-вторых, область контроля вдоль оси *x* увеличилась от 30 до 120 мм, поэтому в околошовной зоне появились блики множества незаложенных отражателей. Особенно хорошо они видны в области поперечного паза (отражатель *б*), которая отмечена полупрозрачным овалом розового цвета с границей черного цвета (см. рис. 16 [1] и 13 оба слева). Некоторые из этих бликов отмечены выноской «*б?*».

4. СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ

На рис. 14 слева показан результат рентгеновского контроля с применением цифрового матричного детектора, а справа — свернутое по максимуму изображение С-типа в черно-белой палитре при объединении как среднее ЦФА-Х-изображений, восстановленных по акустической схеме **TdT** по *N*-, *P*- и *NP*-каналам (см. рис. 16 [1] слева) при использовании двух антенных решеток. На рентгеновском изображении хорошо заметно плоскодонное отверстие (отражатель 7), а на ЦФА-Х-изображении уверенно обнаружить его блик не удастся. И наоборот, блик паза 1 уверенно виден на ультразвуковом изображении, а на рентгеновском — едва-едва заметен. На рентгеновском изображении хорошо заметны незаложенные отражатели, отмеченные выносками «*б?*», которые возникли при создании поперечного паза (отражатель *б*). На ЦФА-Х-изображении, полученном при использовании двух антенных решеток и 35-градусных

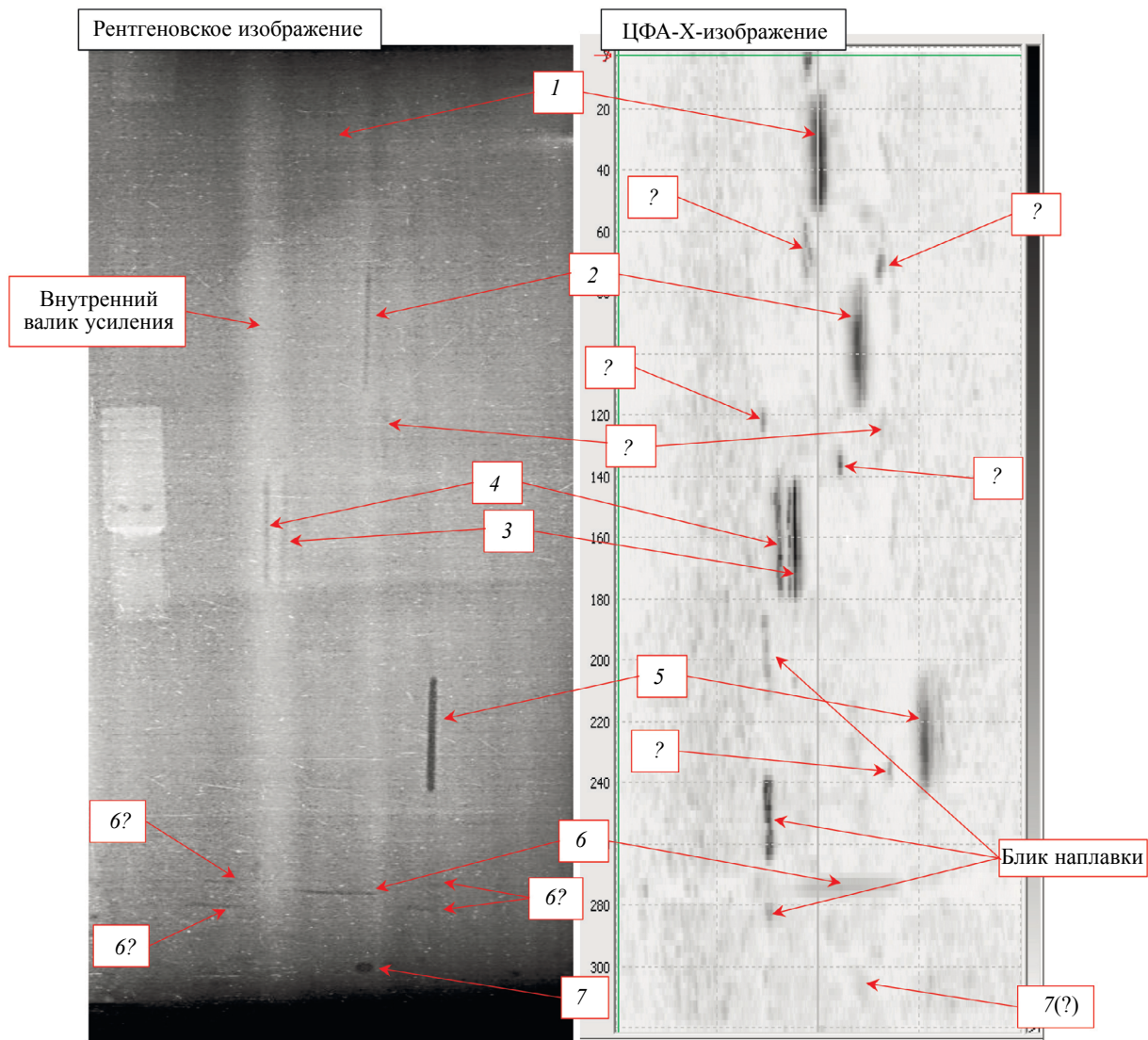


Рис. 14. Слева — рентгенограмма всего образца, справа — свернутое по максимуму изображение С-типа, полученное как объединение по среднему на поперечной волне в режиме тройного сканирования.

призм, блики этих отражателей не заметны. Однако на ЦФА-Х-изображении, представленном на рис. 13 слева, которое было получено при использовании одной антенной решетки и адаптивного протектора, блики этих незаложенных отражателей хорошо видны. На ЦФА-Х-изображении хорошо заметны блики незаложенных отражателей, отмеченные выносками «?», которые, в свою очередь, на рентгеновском изображении не видны. Не следует забывать и о том, что изображения В-типа, восстановленные при ультразвуковом контроле, позволяют определять местонахождение отражателей и их размеры в плоскости xz .

На рис. 15 слева показан фрагмент рентгенограммы с пазами 3 и 4. В центре приведено ЦФА-изображение С-типа, полученное как объединение по среднему изображений по трем каналам на поперечной волне, на правой панели приведено подобное МЭ-изображение. Изображения С-типа свернуты по максимуму, а их контрастность увеличена на 6 дБ. На изображениях, полученных по результатам ультразвукового контроля, трещиноподобные отражатели 3 и 4 существенно легче обнаружить, нежели на рентгеновском изображении. На МЭ-изображении можно уверенно различить верхнюю и нижнюю границы паза 3 с углом поворота 20 град относительно оси z .

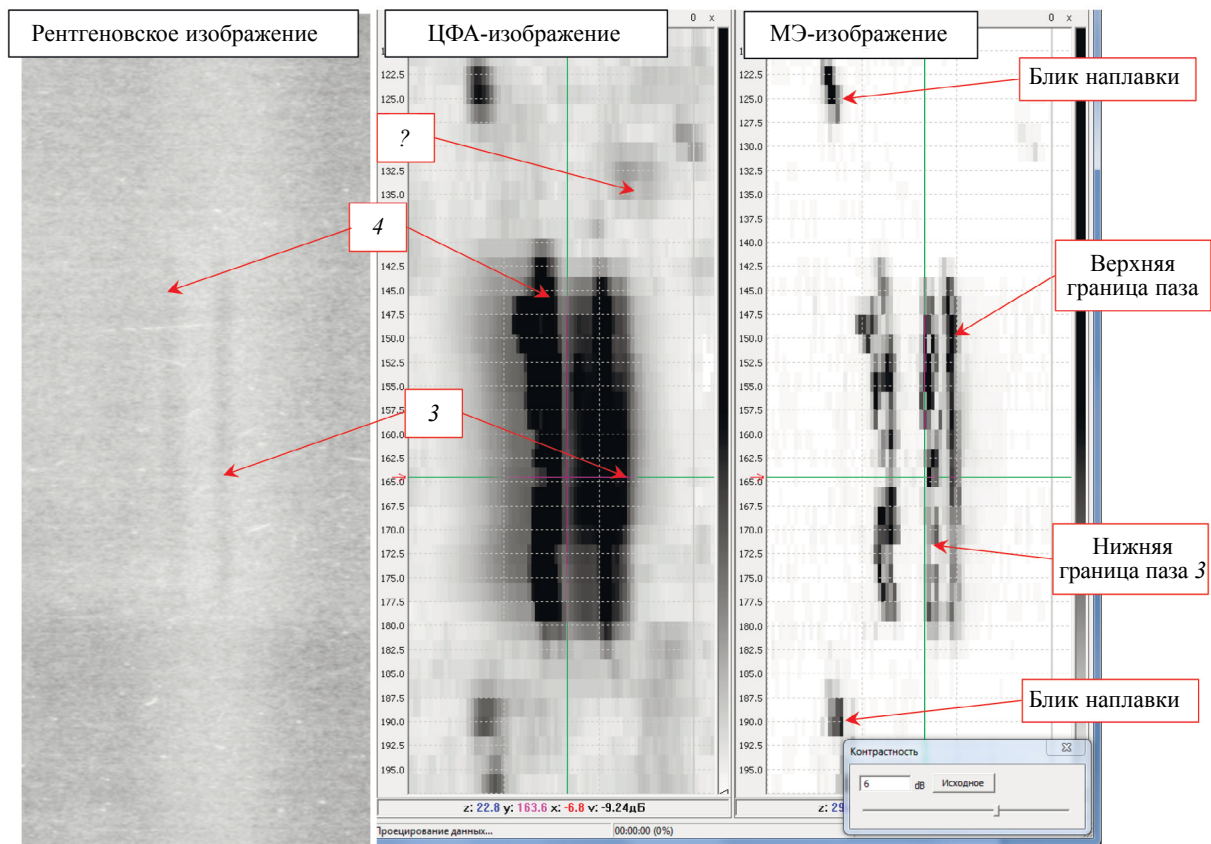


Рис. 15. Слева фрагмент рентгенограммы с пазами 3 и 4, в центре — ЦФА-изображение С-типа, справа — МЭ-изображение С-типа.

ВЫВОДЫ

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

Применение метода МЭ показало свою эффективность. МЭ-изображения имеют фронтальное и лучевое разрешения как минимум в два раза меньше, чем для ЦФА-изображения (см. рис. 2—5). При этом можно использовать около 10 % от полного объема эхосигналов. Применение для выбора оптимального коэффициента Лагранжа α критерия L -кривой показало свою эффективность.

Наличие наплавки, упругие свойства которой существенно отличаются от материала трубы, приводит к искажениям изображений и, следовательно, к ограничению числа используемых акустических схем. Если упругие свойства наплавки известны, то можно эффективно использовать акустические схемы с отражением от дна (см. рис. 6 справа и 7).

Изображения, восстановленные по акустическим схемам с использованием головной и боковой волн, могут дать дополнительную информацию об отражателе (см. рис. 8).

Применение адаптивного протектора позволяет получить информацию о профиле поверхности объекта контроля, учесть ее в методе ЦФА или ЦФА-Х и восстановить изображения отражателей без искажений (см. рис. 10 и 11 оба справа).

Изображения трещиноподобных отражателей, полученные при ультразвуковом контроле, более информативны, чем изображения, полученные при рентгеновском контроле (см. рис. 14 и 15).

Автор выражает благодарность руководителю участка УЗК отдела ядерной безопасности и надежности Ленинградской АЭС О.О. Шнелю за предоставление образца трубопровода Ду800

с искусственными отражателями и начальнику лаборатории неразрушающих методов контроля ООО «ПромЭнергоМонтаж» Ю.В. Бойко за проведение рентгеновского контроля образца.

ООО «Научно-производственный
центр «ЭХО+»
Москва

Поступила в редакцию
25 октября 2016 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базулин Е.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопровода типа Ду800. Часть 1. Восстановление изображения отражателей методом ЦФА.— Дефектоскопия, 2017, № 3, с.12—26.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Изд. 3-е, испр.— М.: Наука, 1986. — 288 с.
3. Kullback S. Information Theory and Statistics. — New York, 1968.— 416 p.
4. Maisinger K., Hobson M.P., Lasenby A.N. Maximum entropy image reconstruction using wavelets.— Mon. Not. R. Astron. Soc., 2003, p. 1—21.
5. Bazulin E.G. Reconstructing the deflector images from the ultrasonic echo signals by the maximum entropy method. — Applied Physics Research, 2014, v. 6, No. 6, p. 87—106. DOI: 10.5539/APR.V6N6P87.
6. Морозов В.А. Алгоритмические основы методов решения некорректных задач. — Вычислительная математика и программирование, 2003, т. 4, с. 130—141.
7. Van Kempen G.M.P., Van Vliet L.J. The influence of the regularization parameter and the first estimate on the performance of Tikhonov regularized non-linear image restoration algorithms. — Journal of Microscopy, 2000, v. 198, p. 63—75.
8. Морозов В.А. О некоторых общих условиях регуляризуемости некорректных вариационных задач. — Вычислительная математика и программирование, 2004, т. 5, с. 31—40.
9. Hansen P.C. The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems; in Computational Inverse Problems in Electrocardiology. — Southampton: WIT Press, 2001, p. 119—142.
10. Валяшко Г.М., Страхов В.Н. Алгоритм адаптивной регуляризации линейных некорректных задач. — Доклады АН СССР, 1981, т. 259, № 3, с. 100—113.
11. Francini E., Höft T., Santosa F. An inverse problem in nondestructive evaluation of spot-welds. — Inverse Problems, 2006, v. 22, p. 645—661.
12. Технология NVIDIA CUDA™, URL:<http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (дата обращения: 24.10.2016).
13. Casula O., Toullelan G., Roy O., Dumas Ph. Ultrasonic nondestructive testing of complex components with flexible phased-array transducers. — 10th ECNDT, Moscow, Russia, 7—11 June, 2009.
14. Базулин Е.Г. Учет анизотропных свойств сварного соединения при восстановлении изображения отражателей по эхосигналам, измеренным ультразвуковой антенной решеткой. Дефектоскопия, 2017, № 1, с.11—25.
15. Schallert R., Heilmann P., Scholz H., Schubert F., Barth M., Fröhlich M. Phased array techniques for an optimized inspection of dissimilar welds. — 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 16—20 April 2012. URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/149_wcndtfinal00149.pdf (дата обращения: 24.10.2016).
16. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Применение антенных решеток и кремнийорганического полимера в качестве иммерсионной среды для проведения ультразвукового контроля объектов с неровной поверхностью.— Дефектоскопия, 2014, № 7, с. 3—11.