

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ СВАРНОМУ СОЕДИНЕНИЮ, ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПО СХЕМЕ TOFD

© 2021 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, А.Х. Вопилкин<sup>1</sup>, Д.С. Тихонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,  
Технопарк «Строгино»  
\*E-mail: bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021; после доработки 19.03.2021  
Принята к публикации 29.03.2021

Метод TOFD, широко используемый в ультразвуковой дефектоскопии, позволяет по фазе эхосигналов отличать трещину от объемного отражателя и с высокой точностью определять ее высоту. Однако метод TOFD без сканирования пьезопреобразователями поперек сварного соединения не позволяет определить смещение отражателя от центра шва, что очень важно при оценке результатов контроля. Используемые для этого сканирующие устройства имеют сложную конструкцию, цена их выше, чем у одномерных сканирующих устройств, и, главное, — значительно возрастает время контроля. Если использовать эхосигналы, отраженные от дна объекта контроля с учетом смены типа волны, то по множеству парциальных изображений, восстановленных методом цифровой фокусировки антенной (ЦФА), можно получить объединенное изображение отражателя. Если использовать эхосигналы, измеренные в совмещенном режиме для каждого пьезопреобразователя, то можно оценить смещение отражателя поперек сварного соединения с точностью  $\pm 1,5$  мм. Численные и модельные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода.

*Ключевые слова:* Time of Flight Diffraction (TOFD), цифровая фокусировка антенной (ЦФА), Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM).

**DOI:** 10.31857/S0130308221060026

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для современной промышленности Российской Федерации характерна эксплуатация технически сложных объектов и систем, таких как атомные электростанции, нефтехимические производства, системы транспортировки нефти и газа и т.д. Аварии на этих объектах могут привести к катастрофам, которые могут сопровождаться не только колоссальными финансовыми потерями, но и человеческими жертвами [1]. Большое значение в обеспечении надежной работы таких объектов имеет периодический контроль их состояния при эксплуатационном обслуживании. Особенно это важно, когда срок эксплуатации промышленного объекта близок к завершению. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля (УЗК) позволяют решать задачу определения типа отражателя, его координат и размеров и поэтому широко используются при проведении эксплуатационного контроля.

В 1970-х годах для контроля сварных соединений объектов атомной энергетики был разработан метод Time of Flight Diffraction (TOFD)[2]. Неоспоримым достоинством TOFD являются [3—5]: высокая скорость проведения контроля на продольной волне двумя пьезопреобразователями (ПЭП), перемещаемыми вдоль сварного соединения (перпендикулярное сканирование), небольшой объем памяти компьютера для хранения измеренных эхосигналов и высокая точность определения высоты трещины. Так, в статье [6], посвященной контролю турбин с использованием ПЭП с частотой 4 МГц, достигнутая погрешность измерения высоты трещин равна  $\pm 0,31$  мм, что составляет примерно четверть длины волны. А возможность проанализировать фазу рассеянных импульсов может помочь определить тип обнаруженного отражателя. Метод TOFD имеет и недостатки: при наличии шума обнаружить эхосигналы и определить их фазы становится проблематичным, невозможно локализовать отражатель в направлении, поперечном сварному соединению. Для этого нужно провести дополнительные измерения со сканированием ПЭП поперек сварного соединения и восстановить изображение отражателей методом Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) [7, 8], что уменьшает скорость проведения контроля и усложняет конструкцию сканирующего устройства.

Таким образом, разработка алгоритма, позволяющего оценить по измеренным TOFD-эхосигналам без сканирования поперек сварного соединения не только высоту трещины, но и ее смещение относительно центра сварного соединения, является актуальной задачей.

## 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ СВАРНОМУ СОЕДИНЕНИЮ

На рис. 1 показаны два ПЭП, расположенные с разных сторон от сварного соединения, на расстоянии  $b$  друг от друга. Эхосигналы, измеренные в совмещенном режиме, будем обозначать как измеренные по N- и P-каналам. Классические TOFD-эхосигналы, когда излучение и прием происходят разными ПЭП, будем считать измеренными по NP-каналу. Обычно в режиме TOFD измерения эхосигналов происходят только при перемещении ПЭП вдоль оси  $y$ , которая перпендикулярна плоскости рисунка (перпендикулярное сканирование).

### 2.1. Восстановление изображения отражателей методом SAFT

Изображение отражателей в плоскости  $xz$  можно восстановить методом SAFT по эхосигналам  $p(x, t)$ , измеренным при сканировании двумя ПЭП вдоль оси  $x$  по формуле:

$$\hat{\varepsilon}_{SAFT}(\mathbf{r}_i; as) = \int_{A_x} p(x, t - t_{del}(x, \mathbf{r}_i, x + b; as) + t_{max}) dx, \quad (1)$$

где  $A_x$  — области сканирования вдоль оси  $x$ ;  $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i) \in S_i$  — координаты точки области восстановления изображения отражателей  $S_i$  (ОВИ);  $b$  — постоянное расстояние между излучателем и приемником;  $t_{del}(x, \mathbf{r}_i, x + b; as)$  — время пробега импульса от точки излучения  $x$  до точки  $\mathbf{r}_i$  и до точки приема  $x + b$  для заданной акустической схемы  $as$ ;  $t_{max}$  — время нарастания импульса зондирующего импульса. На рис. 1 ОВИ отмечена полупрозрачным прямоугольником красного цвета.

Под акустической схемой, которую обозначим как  $as$ , будем подразумевать описание лучевой траектории распространения импульса с учетом трансформации типа волны при отражении его от границ объекта контроля. Для описания акустических схем будем пользоваться следующим правилом: буква  $d$  обозначает отражение от дефекта; тип волны после отражения от границ будем обозначать буквами L (продольная) и T (поперечная). Последовательная запись типов волны и событий будет определять акустическую схему. Подобный способ обозначения акустических схем используется в программе CIVA [9], предназначенной для моделирования результатов неразрушающего контроля, в частности, ультразвукового. Например, акустическая схема LLdLT описывает ситуацию, когда при излучении продольная волна при отражении от дна не меняет тип, а при приеме продольная волна, отражаясь от дна, трансформируется в поперечную.

### 2.2. Замена механического сканирования на работу с множеством изображений, восстановленных на разных акустических схемах

Однокоординатное сканирование вдоль оси  $y$  в режиме TOFD не сможет дать ответа на вопрос: «С какой стороны сварного соединения находится отражатель УЗ волн?». Это связано с тем, что если область сканирования состоит из одной точки, то изображение точечного отражателя, восстанавливаемое по формуле (1) по акустической схеме LdL, трансформируется в эллипс (рис. 2). Иными словами, дифрагированные сигналы на продольной волне, пришедшие от рассеивателей, находящихся на эллипсе (показан зеленым цветом<sup>1</sup> на рис. 1), имеют одинаковое время задержки. Если звездой зеленого цвета отмечено положение отражателя, то эхосигналы от него и от отражателей, показанных звездами красного цвета, будут иметь одинаковые времена задержек, но будут отличаться по амплитуде и по форме. На рис. 1 линиями разных цветов схематично показаны фрагменты эллипсов для разных акустических схем, название которых указано в выносках. Если восстановить изображения по формуле (1) с учетом трансформации типов волн и при отражении от дна объекта контроля, то множество эллипсов должно пересечься в месте расположения отражателя. Парциальные изображения на разных акустических схемах, а их — 36 для случая с однократным отражением от дна с учетом трансформации типа волны, можно объединить как сумму или медиану модулей по формулам:

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

$$\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{N_{as}} |\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n)|, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i) = M_{\delta=1}^{N_{as}} (T(|\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n), l|)), \quad \text{где } l = \langle |\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i; as_n)| \rangle, \quad (3)$$

где  $M$  — операция медианы для  $N_{as}$  парциальных изображений,  $T$  — операция отсечки по уровню  $l$ , равному среднему значению парциального изображения. Следует отметить, что получение объединенного изображения по формуле (3) эффективно при наличии точечных отражателей, к которым можно отнести края трещин.

Если в распоряжении имеются эхосигналы, измеренные по N- и P-каналам, то количество акустических схем для трех каналов увеличивается до 108. Отметим, что в классическом режиме TOFD не предполагается измерения дополнительных эхосигналов по N- и P-каналам. Из парциальных изображений  $\hat{\mathbf{e}}_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $\hat{\mathbf{e}}_P(\mathbf{r}_i)$  и  $\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i)$ , восстановленных по формуле (3), можно сформировать объединенное изображение для оценки смещения отражателя относительно оси  $x$ :

$$\hat{\mathbf{e}}(\mathbf{r}_i) = M (T(|\hat{\mathbf{e}}_N(\mathbf{r}_i), l|), T(|\hat{\mathbf{e}}_P(\mathbf{r}_i), l|), T(|\hat{\mathbf{e}}_{NP}(\mathbf{r}_i), l|)). \quad (4)$$

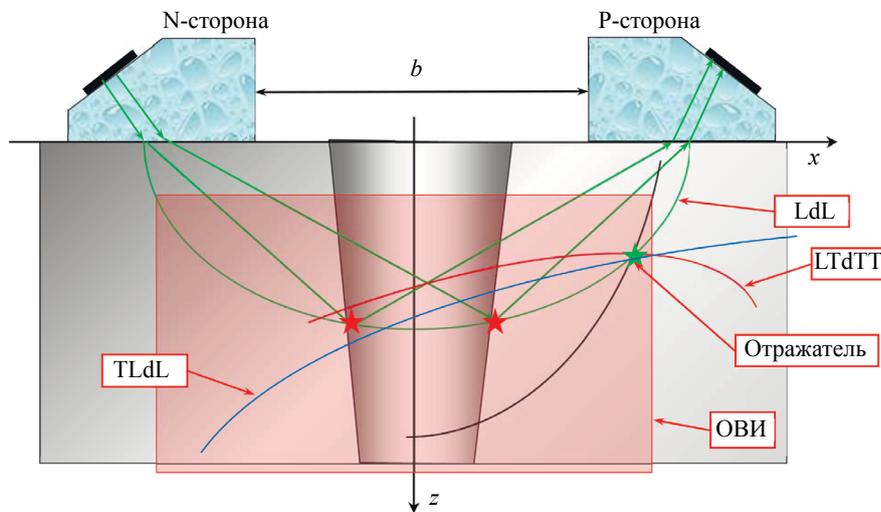


Рис. 1. Схема регистрации эхосигналов методом TOFD.

Таким образом, идея получить информацию о координатах отражателя поперек сварного соединения по TOFD-эхосигналам заключается в замене сканирования ПЭП вдоль оси  $x$  на получение объединенного изображения по многим парциальным изображениям на разных акустических схемах по N-, P- и NP-каналам.

Эффективность работы такого метода связана с формой диаграммы направленности ПЭП — чем шире диаграмма направленности, тем больше амплитуда импульсов поперечной волны при преломлении на границе «призма—объект контроля». Поэтому целесообразно использовать ПЭП с рабочей частотой 5 МГц и с размерами пьезоэлемента 3 мм и менее.

Из-за разных значений коэффициента отражения от границ объекта контроля, из-за разных значений коэффициента преломления на границе «призма—объект контроля» и обратно не каждая акустическая схема будет информативна — амплитуда эхосигналов для некоторых акустических схем будет пренебрежимо малой. Поэтому важным методическим вопросом является выбор оптимального списка акустических схем, и, конечно, он будет меньше максимального значения 36 для каждого из каналов. Дополнительно для уменьшения уровня ложных бликов изображения отражателей в данной работе был применен следующий прием: для каждой акустической схемы каждого канала рассчитывалась амплитуда точечного отражателя во всех точках ОВИ. Полученные маски  $M_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $M_P(\mathbf{r}_i)$  и  $M_{NP}(\mathbf{r}_i)$  умножались на соответствующие парциальные изображения в формуле (3).

### 3. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовались эхосигналы, рассчитанные программой CIVIA 2020 [9].

#### 3.1. Описание модели численного эксперимента

Моделировалась ситуация, когда объект контроля толщиной 50 мм обладает свойствами стали марки 20, ПЭП работают на частоте 5 МГц, а призмы «сделаны» из рексолита и имеют угол наклона 21,5 град, стрелу 6 мм и расстояние пробег по призме 4 мм. Расстояние между передними гранями призм равно 120 мм. Рассчитывались эхосигналы для N-, P- и NP-канала, рассеянные трещиной высотой 5 мм с центром в точке (5, 25) мм на прямом луче и при однократном отражении от дна с учетом трансформации типа волны при отражении. Объединение парциальных изображений трех каналов в виде суммы (формула (2)) не позволило получить изображение, пригодное для анализа, поэтому в дальнейшем объединение происходило с помощью операции медиана (формула (3)).

#### 3.2. Использование ПЭП с одним пьезоэлементом

На рис. 2 представлено два из тридцати шести парциальных SAFT-изображений для NP-канала, восстановленных по формуле (1) по акустическим схемам LdL (а) и TdTТ (б). Пиктограммы этих схем показаны в правом верхнем углу каждого изображения. Зеленым цветом обозначены лучи на продольной волне, а красным — на поперечной. Видно, что в обеих случаях эллипсоидальные блики проходят через края трещины, которая показана линией красного цвета. Из-за умножения на маску  $M_{NP}(\mathbf{r}_i)$  эллипсоидальный блик уменьшает свою амплитуду при приближении к краям ОВИ.

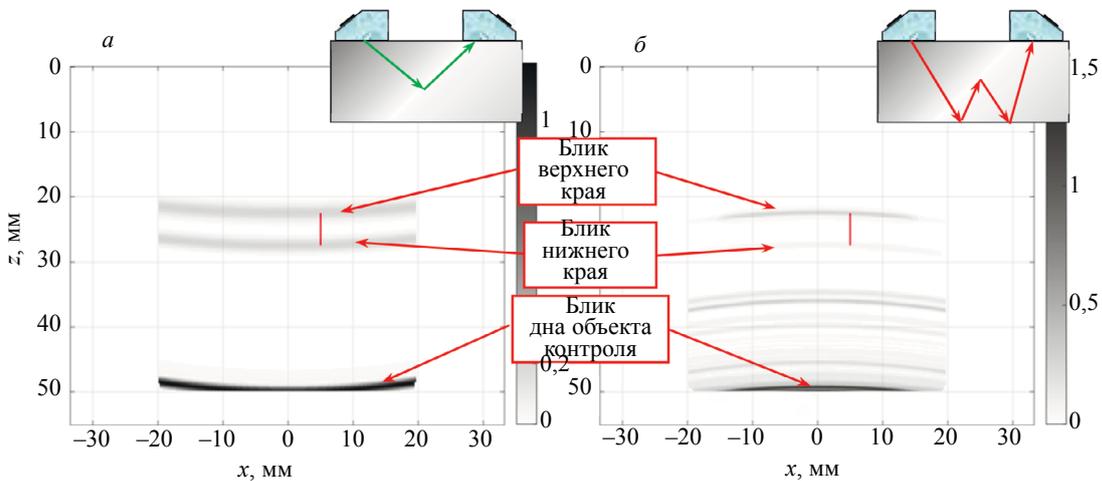


Рис. 2. Парциальные изображения акустических схем LdL (а), TdTТ (б) и схематическое представление лучей акустических схем.

На рис. 3а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения для P-, N- и NP-каналов соответственно. Видно, что определить смещение бликов краев трещины можно по изображениям N- и P-каналов. Изображение, полученное по эхосигналам NP-канала, имеет симметричный вид относительно оси  $x$  и не позволяет определить смещение трещины. Тем не менее на рис. 3в есть блики, соответствующие краям трещины. На рис. 3г показан результат объединения по формуле (4) изображений по трем каналам  $\hat{\epsilon}_N(\mathbf{r}_i)$ ,  $\hat{\epsilon}_P(\mathbf{r}_i)$  и  $\hat{\epsilon}_{NP}(\mathbf{r}_i)$ . В его формировании участвуют 108 парциальных изображений (по 36 изображений для N-, P- и NP-каналов). Объединенное изображение недостаточно высокого качества, но позволяет определить (с точностью  $\pm 0,5$  мм) с какой стороны от центра сварного соединения находится трещина. Если подобные расчеты провести при наличии еще одной трещины, то количество ложных бликов возрастает, и это затруднит идентификацию как бликов вершин трещин, так и их смещений по оси  $x$ .

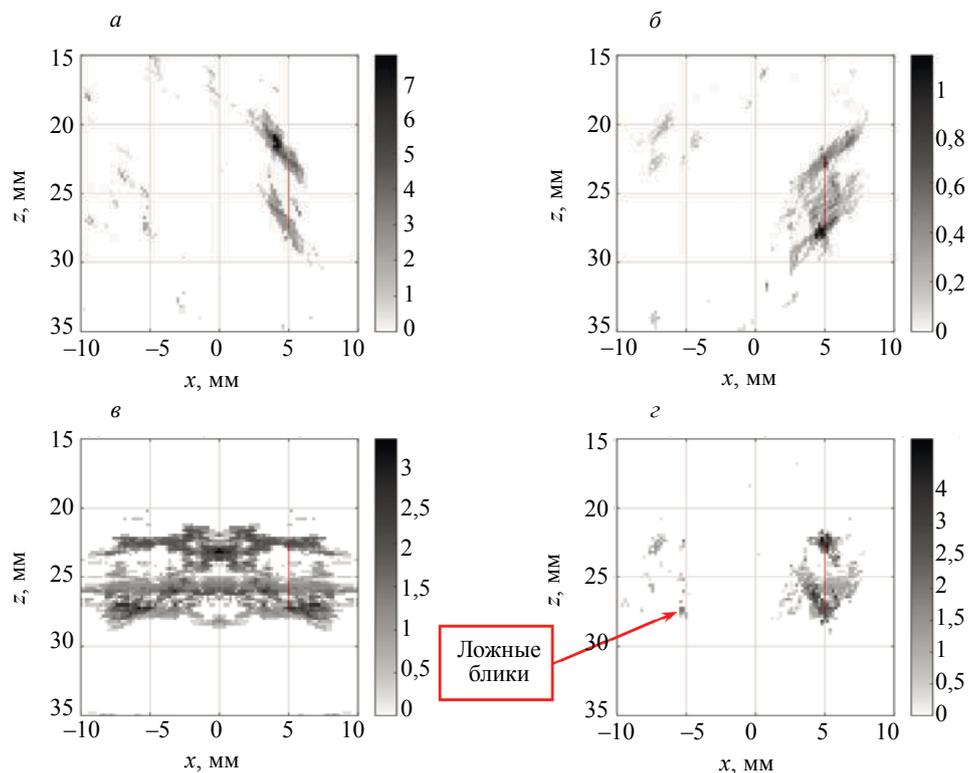


Рис. 3. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а—в), объединенное по формуле (4) изображение (г).

При реальном контроле может возникнуть ситуация, когда толщина объекта контроля известна с некоторой точностью. Проведенные численные эксперименты показали, что предложенный метод сохраняет работоспособность, если толщина образца задана с ошибкой меньше, чем  $\pm 1$  мм.

Заменив ПЭП на антенную решетку из  $N_e$  элементов, по ЦФА-изображению, восстановленному по эхосигналам NP-канала, можно будет уверенно определить координаты краев трещины [10]. Но это потребует использования более сложной многоканальной аппаратуры и приведет к резкому увеличению объема измеренных эхосигналов — в каждой точке санирования вместо одного TOFD-эхосигнала придется измерить  $N_e \times N_e$  эхосигналов в режиме двойного сканирования, в зарубежной литературе Full Matrix Capture (FMC).

#### 4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа серии «АВГУР 5.2», разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [11].

Эффективность объединения парциальных изображений зависит не только от точности определения толщины объекта контроля и скорости продольной волны в нем, но и от точности определения таких параметров призмы, как угол наклона, скорость продольной волны, стрела и расстояние пробега в призме. Поэтому для повышения эффективности предложенного алгоритма была разработана и использована процедура калибровки призмы и ПЭП, основанная на способе калибровки призмы и антенной решетки, изложенной в статье [12].

##### 4.1. Придонная модель трещин

Объект контроля представлял собой пластину толщиной 25 мм из стали марки 20 с моделями различных отражателей. Эхосигналы от придонного паза высотой 2,5 мм, шириной 0,3 мм и длиной 20 мм, смещенного на расстояние  $-20$  мм по оси  $x$ , регистрировались двумя ПЭП с частотой 5 МГц и с пьезопластиной диаметром 3 мм, установленные на рексолитовые призмы с углом наклона 17,5 град. Апертура сканирования  $A_x$  излучающего ПЭП была равна 120 мм с началом в

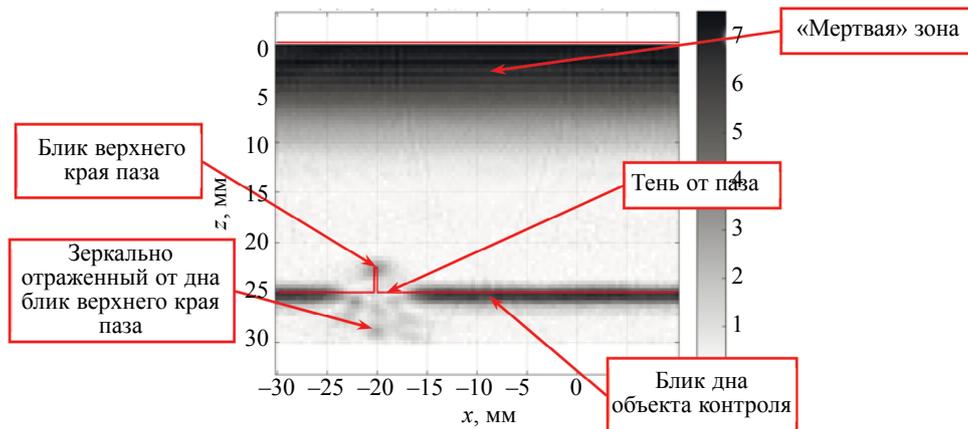


Рис. 4. SAFT-изображения придонного паза высотой 2,5 мм (NP-канал).

точке  $-110$  мм. Шаг сканирования был равен  $0,31$  мм. Приемный ПЭП был смещен относительно излучающего ПЭП на расстояние  $b = 68$  мм, измеряемое между передними гранями призм.

#### 4.1.1. Получение изображения методом SAFT при сканировании вдоль оси $x$

Для восстановления качественного изображения отражателей в плоскости  $xz$  необходимо зарегистрировать эхосигналы при сканировании ПЭП вдоль оси  $x$  и обработать их методом SAFT. На рис. 4 показано SAFT-изображение паза, восстановленное по эхосигналам NP-канала. Линиями красного цвета на изображения нанесены контуры границ объекта контроля и паза. По SAFT-изображению можно определить местоположение придонного паза и оценить его высоту, но достигается это ценой сканирования вдоль оси  $x$ . Следует обратить внимание на «мертвую» зону [13], которая сформирована импульсом головной волны.

#### 4.1.2. Получение изображения объединением различных акустических схем

На рис. 5а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения соответственно для Р-, N- и NP-каналов для случая размещения излучателя в точке  $-70,3$  мм, а приемника — в точке  $-2,3$  мм. Линией красного цвета показана граница образца и придонный паз. Видно, что блик паза, координата которого по оси  $x$  равна  $-20$  мм, хорошо сформировался только по N-каналу, так как центр между ПЭП расположен в точке  $-36,3$  мм. По изображению NP-канала виден только ложный блик и дно образца. Однако на объединенном по формуле (4) изображении (рис. 5г) можно уверенно указать на блик паза. Точность определения смещения отражателя можно оценить как  $\pm 1,5$  мм. Так как высота трещины определяется по TOFD-эхосигналам, то невысокая точность определения высоты паза по изображению на рис. 5г не является принципиальным недостатком предлагаемого метода. В эхосигналах N- и Р-каналов присутствует реверберационный шум и нужно принять меры для его уменьшения. В данной статье измерялся образец реверберационного шума для каждого ПЭП и вычитался из эхосигналов, измеренных по N- и Р-каналам [14].

На рис. 6а—в показаны объединенные по формуле (3) изображения для Р-, N- и NP-каналов для случая размещения излучателя в точке  $-33,1$  мм, а приемника — в точке  $34,9$  мм, так что центр между ПЭП расположен в точке  $-0,9$  мм. Видно, что блик паза хорошо сформировался на изображениях по Р- и NP-каналам. На объединенном по формуле (4) изображении (рис. 6г) можно идентифицировать блик паза. Точность определения смещения отражателя можно оценить как  $\pm 1,5$  мм.

Рассмотрим теперь случай, когда изображения восстанавливались с использованием эхосигналов для трех положений ПЭП: к эхосигналам для двух выше рассмотренных случаев добавлены эхосигналы, измеренные при размещении излучателя в точке  $-51,7$  мм, а приемника —  $16,3$  мм. На рис. 7а—в показаны изображения по трем каналам, а на рис. 7г — объединенное по формуле (4) изображение, на котором виден всего один блик, соответствующий придонному пазу. Один блик, но с плохим разрешением, виден и по изображению NP-канала.

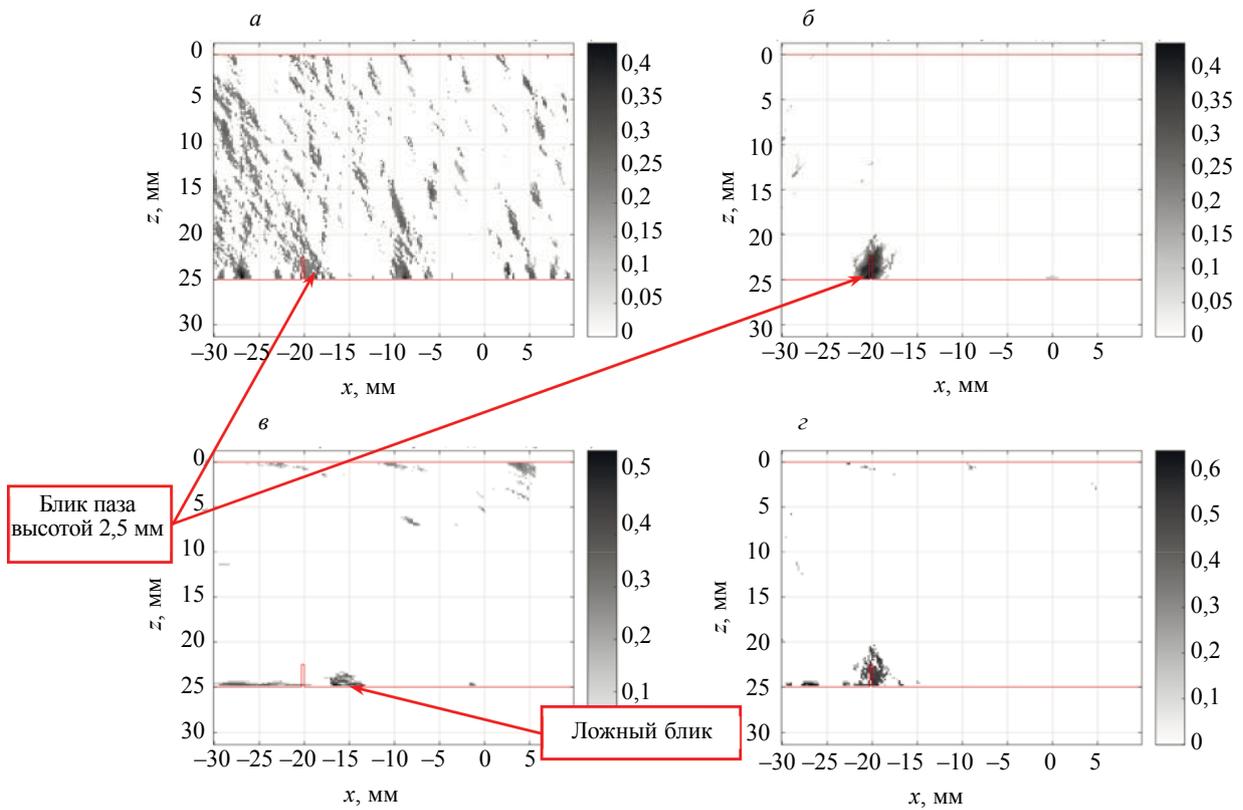


Рис. 5. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а–в), объединенное по формуле (4) изображение (г) (координата излучателя –70,3 мм, приемника –2,3 мм).

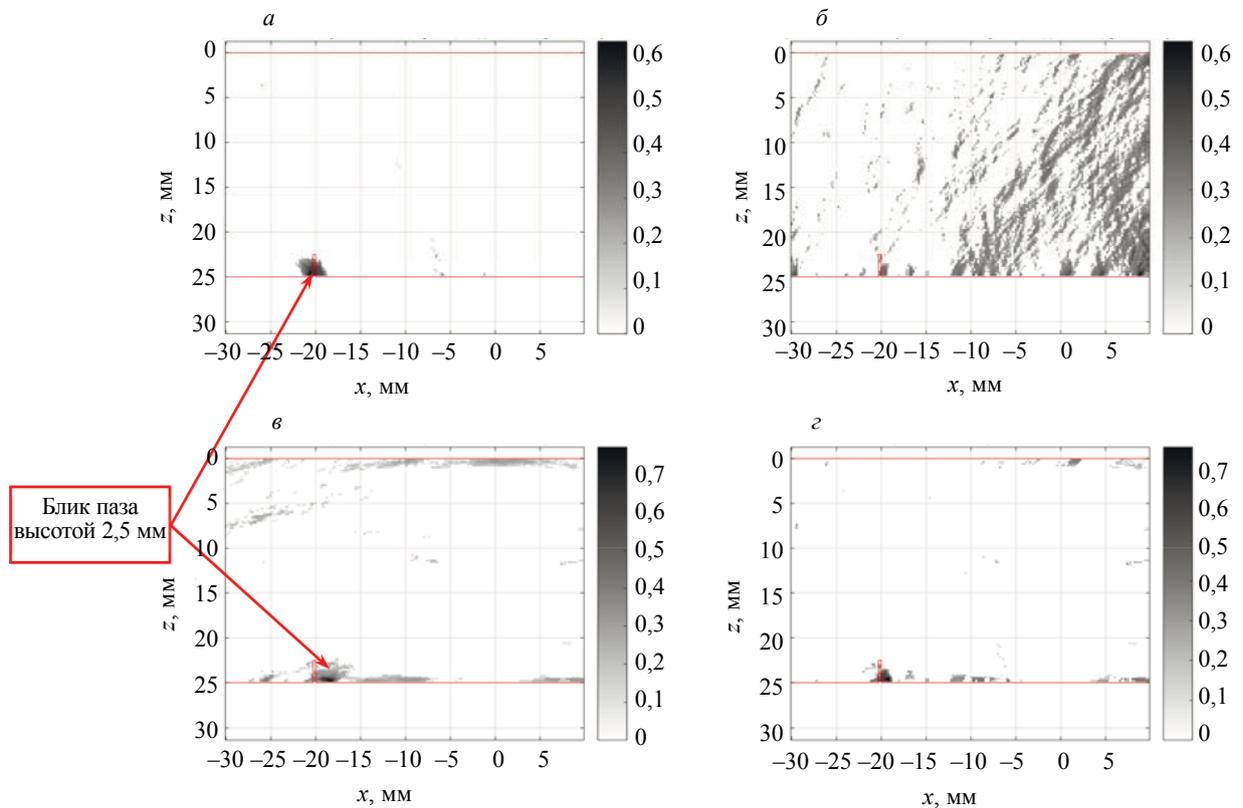


Рис. 6. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а–в), объединенное по формуле (4) изображение (г) (координата излучателя –33,1 мм, приемника 34,9 мм).

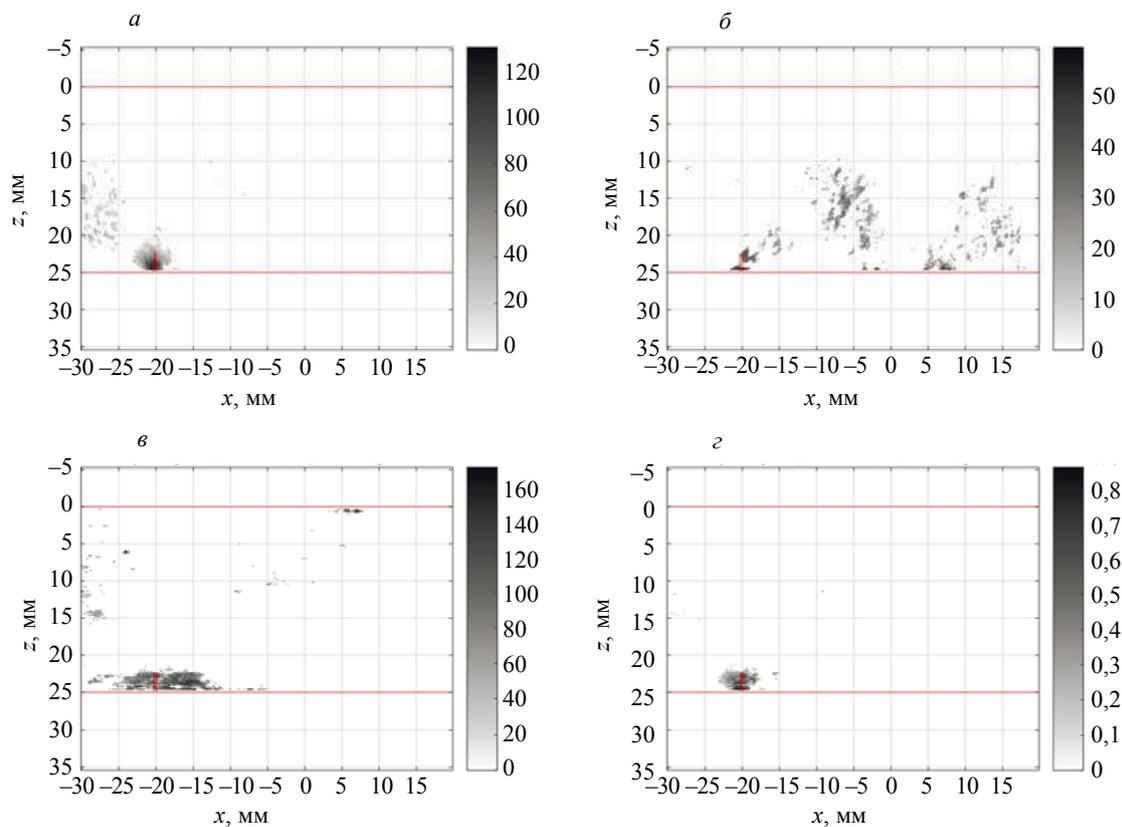


Рис. 7. Объединенные по формуле (3) изображения для N-, P- и NP-каналов (а—в), объединенное по формуле (4) изображение (г). Для расчета использовались эхосигналы, измеренные в трех положениях ПЭП.

Качество изображений было бы выше, если использовались не 3 эхосигнала по каждому каналу, а 9 эхосигналов при перекрестной работе, например, первый ПЭП по N-каналу излучил зондирующий импульс, а третий ПЭП зарегистрировал эхосигнал. Однако такой режим скорее характерен для работы антенной решетки в режиме двойного сканирования [10].

## 5. ВЫВОДЫ

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

Предложенный метод позволяет заменить механическое санирование двумя ПЭП вдоль оси  $x$  на формирование по формулам (3) и (4) SAFT-изображения при объединении 108 парциальных изображений для одного положения ПЭП. В отличие от классического метода TOFD, предложенный метод предполагает использование эхосигналов, когда ПЭП работают в совмещенном режиме.

В численных экспериментах предложенный метод показал хороший результат и позволил определить сдвиг отражателя относительно середины образца с точностью  $\pm 0,5$  мм без сканирования вдоль оси  $x$ .

В модельных экспериментах предложенный метод позволил определить координаты придонного паза высотой 2,5 мм относительно середины образца с точностью  $\pm 1,5$  мм. Такое уменьшение точности по сравнению с численным экспериментом можно объяснить присутствием остатков реверберационного шума в совмещенных каналах и ошибками при задании таких параметров контроля, как толщина образца, скорость продольной и поперечной волны в нем, расстояние между ПЭП.

При создании методики для контроля конкретного объекта качество объединенного изображения можно повысить за счет определения оптимального списка акустических схем по каждому каналу.

Повысить качество объединенного изображения можно при использовании двух двухэлементных ПЭП или использовании четырех ПЭП, по два ПЭП с каждой стороны шва. В этом случае можно обойтись без дополнительных N- и P-каналов и работать с эхосигналами только по NP-каналу. Еще большее увеличение числа ПЭП позволит повысить качество объединенного изображения (см. рис. 7). Но такой способ регистрации эхосигналов будет больше напоминать работу с антенными решетками в режиме FMC.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная\\_катастрофа\\_под\\_Уфой](https://ru.wikipedia.org/wiki/Железнодорожная_катастрофа_под_Уфой) (дата обращения: 25.12.2020).
2. *Silk M.G., Lidington B.H.* The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth // *Non-Destructive Testing*. 1975. V. 8. June. P. 146—151.
3. ISO 16828:2012. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Дифракционно-временной метод как метод для обнаружения и оценки размеров несплошностей, 2012.
4. ISO 10863:2011. Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод. Применение дифракционно-временного метода (TOFD), 2011.
5. *Ермолов И.Н.* Дифракционно-временной метод контроля // *В мире НК*. 2001. № 2 (12). С. 7—11.
6. *Натх С.К., Баласубраманиам К., Кришнамурти С.В., Нарайна Б.Х.* Определение размеров выходящих на поверхность трещин методом TOFD // *В мире НК*. 2007. № 3 (37). С. 10—15.
7. *Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D.* SAFT — the Evolution of a Signal Processing Technology for Ultrasonic Testing // *NDT International*. 1986. V. 19. P. 163—167.
8. *Mooshofer H., Boehm R., Heinrich W., Fendt K., Goldammer M., Kolk K., Vrana J.* Amplitude-based Defect Sizing of SAFT-Results - From Imaging to Quantitative Measurement / Conference: 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018). At: Gothenburg, Sweden. V. 12.
9. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 07.01.2021).
10. *Базулин Е.Г.* Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопровода типа Ду800. Часть 2. Повышение качества изображения, сравнение с результатами рентгеновского контроля // *Дефектоскопия*. 2017. № 5. С. 12—24.
11. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 07.01.2021).
12. *Базулин Е.Г.* Калибровка ультразвуковой антенной решетки, установленной на призму // *Дефектоскопия*. 2014. № 4. С. 50—63.
13. *Moles M., Robertson L., Sinclair T.* Developments in time-of-flight diffraction (TOFD) / 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa. 2012.
14. *Bazulin E. G.* Reducing the Level of Weakly Changing Noise by the Decorrelation Method during Ultrasonic Monitoring Using Antenna Arrays // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 4. P. 310—317. [*Базулин Е.Г.* Уменьшение уровня слабо меняющихся помех методом декорреляции при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 14—21.]