

УДК 534.8+620

PACS: 43.60.+d

## **Определение профиля поверхности объекта контроля при автоматизированном неразрушающем ультразвуковом контроле в иммерсионном режиме и восстановление изображений дефектов методом SAFT**

Базулин Е.Г., Рухайло Н.В.

ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

123458, Москва, ул. Твардовского д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: [bazulin@echoplus.ru](mailto:bazulin@echoplus.ru)

В статье рассматривается вопрос применения эластичного кремнийорганического полимера («акваполимер») в качестве иммерсионной среды для обеспечения стабильного акустического контакта между объектом контроля и пьезопреобразователем при автоматизированном ультразвуковом контроле объектов с неровной поверхностью. Применение «акваполимера» позволяет уменьшить расход воды при проведении ультразвукового контроля. Для восстановления изображения дефектов применяется модификация метода SAFT, учитывающая профиль поверхности объекта контроля, что позволяет повысить качество изображения. Предложен алгоритм получения информации о профиле поверхности объекта контроля и учёта этого профиля при восстановлении изображений дефектов методом SAFT. В модельных экспериментах получены изображения дефектов с учётом преломления лучей на неровной поверхности.

Ключевые слова: автоматизированный ультразвуковой неразрушающий контроль, метод SAFT (**Synthetic Aperture Focusing Technique**), профиль поверхности объекта контроля, иммерсионный режим контроля, полимер на кремнийорганической основе.

## **1. Введение**

В практике автоматизированного ультразвукового контроля широкое применение нашли когерентные методы восстановления изображения дефектов. Качество изображения дефектов зависит от стабильности акустического контакта и формы поверхности объекта контроля, по которой перемещается пьезопреобразователь. Если неровность поверхности объекта контроля превышает половину длины волны, то это существенно снижает эффективность применения когерентных способов ультразвукового контроля из-за ухудшения раздающей способности и уменьшения отношения сигнал/шум. Ухудшение или потеря акустического контакта также приводит к падению качества изображения дефектов. Поэтому для получения высококачественных изображений дефектов при автоматизированном ультразвуковом контроле необходимо, во-первых, обеспечить стабильный акустический контакт, во-вторых, необходимо получить информацию о форме поверхности объекта контроля, которая должна быть учтена при восстановлении изображений дефектов.

### **1.1. Обеспечение акустического контакта**

Так как ультразвуковые волны отражаются от тончайших воздушных зазоров, то для надёжного ввода ультразвука в объект контроля необходимо предпринять специальные меры.

При контроле контактным способом преобразователь прижимают к поверхности объекта контроля, предварительно смазанной контактной жидкостью (маслом, глицерином, обойным клеем и т.п.) [1]. Жидкость должна быть безвредной для дефектоскописта, обладать хорошими смачивающими свойствами и не вызывать коррозии объекта контроля. Вода не обладает последними двумя свойствами, поэтому её не рекомендуется применять при контроле ряда объектов атомной энергетики.

Для улучшения контакта используют преобразователи с эластичным протектором (слоем, закрывающим пьезопластину) в виде плёнки из маслостойкой резины или другого материала, облегчающего неровности поверхности объекта контроля.

Очень эффективным для обеспечения хорошего акустического контакта является иммерсионный способ ввода ультразвука, когда между преобразователем и поверхностью объекта контроля вводят слой жидкости толщиной много больше длины волны. При этом, либо изделие целиком погружают в иммерсионную ванну, либо используют струю воды, либо применяют локальную ванну для части объекта контроля. Используют также локальную иммерсионную ванну, контактирующую с изделием через эластичную мембрану.

Иммерсионный способ контакта применяют, когда очень важна стабильность акустического контакта, например, при контроле методом прохождения или эхосквозным методом. В качестве иммерсионной жидкости в большинстве случаев используют воду, в которую добавляют ингибиторы коррозии, а также вещества, улучшающие смачивание. Иммерсионная жидкость не должна содержать воздушных пузырьков. Однако, при эксплуатационном контроле таких объектов как, например, трубопроводы атомных электростанций (АЭС), размещение их в иммерсионной ванне технически нецелесообразно.

## 1.2. Способы контроля качества акустического контакта

Наибольшее распространение на практике получили три способа оценки акустического контакта: по амплитуде импульса ультразвуковых колебаний, отражённых в призму; по амплитуде донного эхосигнала продольной волны; по уровню низкочастотного опорного сигнала [2, 3].

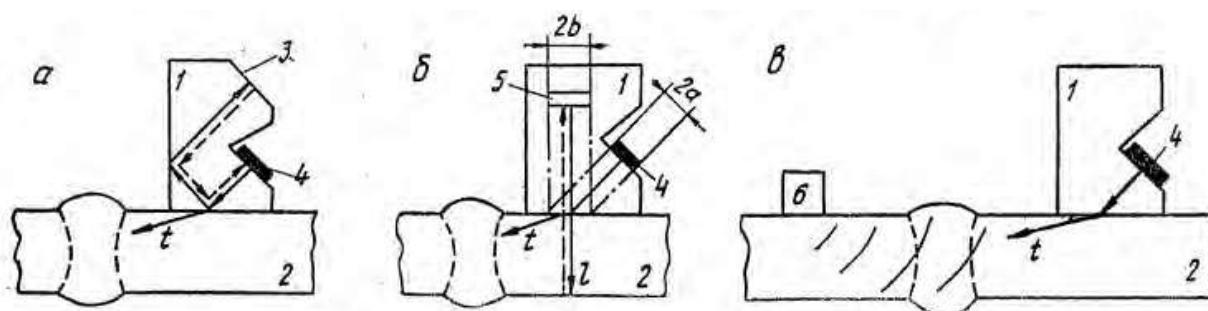


Рис. 1. Реализация способов слежения за состоянием акустического контакта: а- по амплитуде импульса у.з. колебаний, отражённых в призму; б – по амплитуде донного эхосигнала продольной волны; в – по уровню низкочастотного опорного сигнала. Рисунок взят из статьи [2].

При реализации первого способа (Рис. 1а) опорный сигнал формируется в результате обратного отражения ультразвукового импульса в призму (обозначена на рисунке цифрой 1) наклонного преобразователя от его границы с объектом контроля (2) продольной волны. Для обеспечения возможности регистрации опорного сигнала в призме выполнен специальный отражатель (3). После отражения от него импульс ультразвуковых колебаний вновь попадает на границу раздела, отражается от неё и регистрируется пьезопластиной (4). В результате на экране дефектоскопа появится импульс, измеряя амплитуду которого, можно оценить качество акустического контакта.

Второй способ (по амплитуде донного эхо-сигнала продольной волны) (Рис. 1б) основан на измерении амплитуды донного эхо-сигнала продольной волны, возбуждаемой в объекте контроля (2) посредством дополнительной пьезопластины (5), которая установлена в призме (1) наклонного преобразователя параллельно его контактной площадке. Площади ввода в объект контроля пучков ультразвуковых колебаний, излучаемых этой и основной пьезопластиной (4), совпадают. Такой подход требует усложнённой конструкции преобразователя и возможность ввода эхосигналов в дефектоскоп по двум каналам. Кроме того контролируемое изделие должно иметь плоскопараллельные границы, чтобы преобразователь мог зарегистрировать донный сигнал. При контроле объектов со значительным шумом или с неплоскопараллельными границами такой подход контроля качества акустического контакта может оказаться затруднительным.

При реализации третьего способа (по уровню низкочастотного опорного сигнала) (Рис. 1в) состояние акустического контакта определяют, измеряя уровень непрерывного низкочастотного шумового опорного сигнала, возбуждаемого в объекте контроля (2) специальным вибратором (6) и принимаемого пьезопластиной (4) наклонного преобразователя. Реализация данного метода также требует усложнения аппаратуры.

Рассмотренные выше методы позволяют контролировать качество акустического контакта, но не позволяют получить информацию о профиле поверхности объекта контроля.

Для контроля объектов с неровной поверхностью с помощью антенных решёток разработаны специальные технологии, позволяющие автоматически определять форму поверхности и учитывать это обстоятельство при расчёте законов фокусировок [4]. Такой подход позволяет учитывать неровную поверхность, но для антенных решёток сравнительно малой длины.

### **1.3. Метод восстановления изображения SAFT**

Один из наиболее распространенных алгоритмов когерентного восстановления изображений дефектов – фокусировка методом синтезированной апертуры (**Synthetic Aperture Focusing Technique – SAFT**) [5, 6, 7]. Этот простой, но достаточно эффективный метод позволяет получать изображение дефектов с высокой разрешающей способностью и легко учитывать эффекты преломления звука на неровной поверхности объекта контроля, при наличии информации о неровной границе. Для эффективного применения метода SAFT используют преобразователи с широкой диаграммой направленности.

Таким образом, проблема повышения качества акустического контакта при проведении эксплуатационного контроля, получение информации о профиле объекта контроля и учёт его при восстановлении изображения дефектов является актуальной задачей. В статье рассматривается вопрос применения эластичного кремнийорганического полимера («акваполимер») в качестве иммерсионной среды для обеспечения стабильного акустического контакта между объектом контроля и пьезопреобразователем при автоматизированном ультразвуковом контроле объектов с неровной поверхностью. Для восстановления изображения дефектов применяется модификация метода SAFT, учитывающая профиль поверхности объекта контроля при восстановлении изображений дефектов методом SAFT.

## 2. Получение изображений дефектов методом SAFT

Решение обратной задача рассеивания заключается в том, чтобы по известным источникам поля  $q(\vec{r}_i, t)$ , расположенных в области  $S_i$ , измеряя принятое поле  $p(\vec{r}_r, t)$  в области  $S_r$ , найти функцию  $\varepsilon(\vec{r})$ , описывающую отражающие свойства неоднородности в области  $S$ . Сложность решения задачи заключается в том, что помимо определения искомым параметров неоднородностей  $\varepsilon(\vec{r})$  требуется «попутно» определять полное поле  $p(\vec{r}, t)$  во всей области восстановления изображения (ОВИ), что делает задачу нелинейной [8]. В практике ультразвукового контроля обычно используется Борновское приближение, когда амплитуда рассеянного поля полагается много меньше амплитуды падающего поля, то есть  $p(\vec{r}, t) \ll p_i(\vec{r}, t)$ . Со строго математической точки зрения это условие на практике выполняется далеко не всегда, но в практике неразрушающего контроля это, как правило, игнорируется. При работе в совмещённом режиме измеренные эхосигналы в импульсном варианте можно записать в виде свертки

$$p(\vec{r}_r, t) = \int_S G(\vec{r} - \vec{r}_r, t) \varepsilon(\vec{r}) p_i(\vec{r} - \vec{r}_i, t) d\vec{r} = \int_S G(\vec{r} - \vec{r}_r, t)^2 \varepsilon(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (1)$$

где  $G$  - функция Грина для однородного бесконечного пространства.

Получить оценку потенциала рассеивания  $\hat{\varepsilon}(\vec{r})$  можно простым способом. Для этого, размещая точечный дефект в точке  $\vec{r}_i$  в произвольной точке области восстановления изображения, то есть, полагая в формуле (1)  $\varepsilon(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$ , нужно рассчитать принятые эхосигналы  $\hat{p}(\vec{r}_r, t; \vec{r}_i)$  на заданной пространственно-временной апертуре. После этого можно воспользоваться формулой, подобной формуле расчёта функции корреляции

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_r, t) \hat{p}(\vec{r}_r, t; \vec{r}_i) d\vec{r}_r dt . \quad (2)$$

Упростить задачу с вычислительной точки зрения можно, предположив, что, во-первых, излучение и приём происходит в точке, во-вторых, пренебречь изменением амплитуд при расчёте  $\hat{p}(\vec{r}_r, t; \vec{r}_i)$ , и, наконец, в-третьих, заменяя функцию эталонного сигнала  $s(t)$  на  $\delta$ -функцию в точке, где значение огибающей эхосигнала  $s(t)$  максимально. Эти допущения позволяют оценку измеренного поля  $\hat{p}(\vec{r}_r, t; \vec{r}_i)$  провести по простейшей формуле  $\delta(t - t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i))$ , где  $t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$  и  $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$  - время распространения импульса от точки излучения до точки принадлежащей ОВИ и обратно до точки приёма. Поэтому алгоритм восстановления изображения (2) можно в упрощённом виде записать как

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i) = \iint p(\vec{r}_r, t) \delta(t - t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i) - t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i) + t_{\max}) d\vec{r}_r dt , \quad (3)$$

где  $t_{\max}$  - время нарастания эталонного сигнала  $s(t)$ . Если распространение ультразвукового импульса от точки излучения к точке «прицеливания» и обратно к точке приёма происходит по одинаковым акустическим схемам, то  $t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i) = t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$ . Функции  $p(\vec{r}_r, t)$  и  $s(t)$  будем считать комплексными.

Процесс восстановления изображения отражателей по формуле (3) заключается в том, что для заданной точки  $\vec{r}_i$  из массива измеренных эхосигналов  $p(\vec{r}_r, t)$  в соответствии с рассчитанными задержками  $t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$  и  $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$  извлекаются и суммируются все значения  $p(\vec{r}_r, t)$ . Такой метод получения изображения дефектов далее будет традиционно называться **SAFT**, хотя справедливее назвать его корреляционным. Для анализа изображения дефектов нужно рассчитать огибающую функцию  $\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i)$ , которую и будем называть изображением дефектов

$$I(\vec{r}_i) = |\hat{\varepsilon}(\vec{r}_i)|.$$

Основная проблема для расчёта изображения отражателей по формуле (3) - это расчёт времён задержек на излучение  $t_i(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$  и на приём  $t_r(\vec{r}_r, \vec{r}_i)$ .

### 3. Получение изображения дефектов методом SAFT с учётом профиля объекта контроля

Если поверхность объекта контроля неровная и описывается функцией  $t(x)$ , то для того, чтобы воспользоваться формулой (3), нужно рассчитать время задержки в предположении, что импульс распространяется в иммерсионной среде вдоль вектора  $\vec{r}_{i,w}$ , преломляется

на границе объекта контроля и распространяется до точки вдоль вектора  $\vec{r}_{t,o}$ , так, как показано на Рис. 2.

Для определения пути распространения импульсов можно воспользоваться вариационным принципом Ферма [9, 10], гласящим, что распространение света или звука из одной точки в другую в пространстве с заданным распределением скорости  $c(x, z)$  проходит по траектории с минимальным временем пробега. Этот подход позволяет учитывать такие обстоятельства, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля, трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред [11, 12, 13]. Таким образом, определив координату  $x_s$  точки пресечения траектории  $\{\vec{r}_{t,w}, \vec{r}_{t,o}\}$  с поверхностью объекта контроля (Рис. 2), можно, зная скорости  $\{c_w, c_{t,o}\}$  вдоль трассы  $\{\vec{r}_{t,w}, \vec{r}_{t,o}\}$ , рассчитать время задержки  $t_i(\vec{r}_i, \vec{r})$ . Расчёт времён задержек при приёме ультразвуковых импульсов выполняется аналогичным способом.

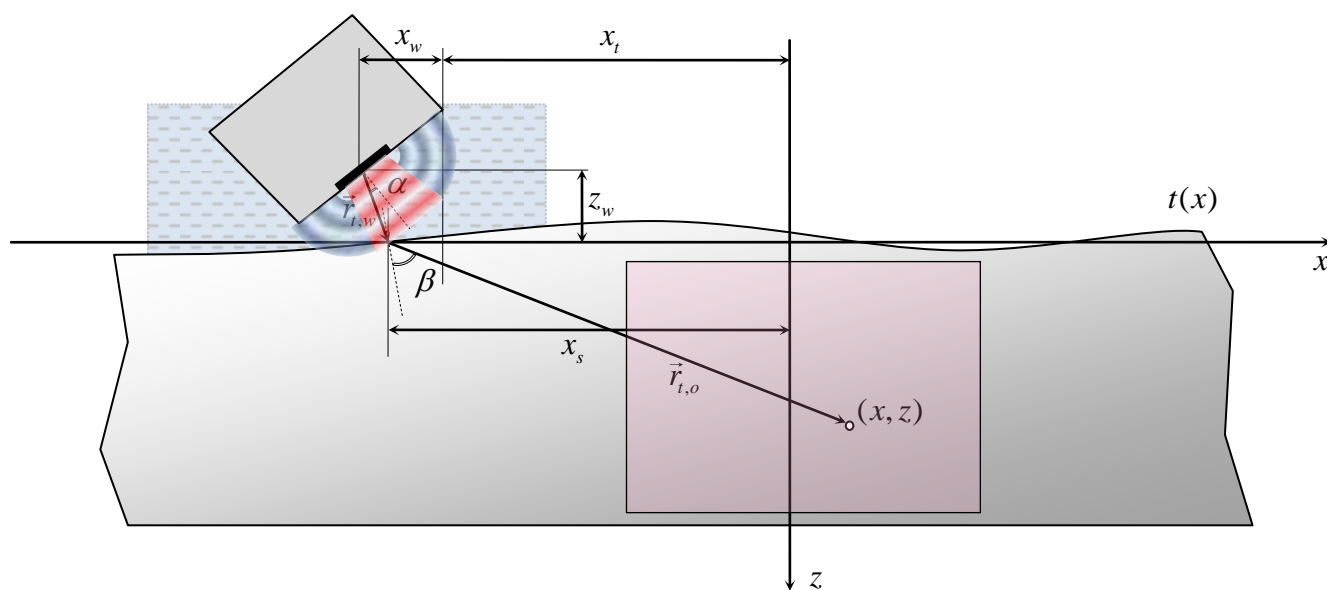


Рис. 2. К расчёту времени пробега импульса вдоль трассы. Квадратом розового цвета отмечена область восстановления изображения.

Получение изображений дефектов с учётом неровной формы поверхности объекта контроля происходит в два этапа. На первом этапе необходимо определить форму поверхности  $t(x)$  объекта контроля, а на втором этапе происходит восстановление изображения дефектов с учётом формы поверхности  $t(x)$ , согласно формуле (3).

Для получения информации о форме поверхности объекта контроля можно воспользоваться двумя преобразователями. Первый преобразователь с нулевым углом наклона к поверхности используется для регистрации эхосигналов отражённых от поверхности объекта контроля. Этот акустический канал используется только для определения формы поверхности  $t(x)$ . Второй преобразователь, наклонённый под углом, необходимым для ввода в объект контроля поперечной волны, используется для регистрации эхосигналов от дефектов. Тем самым для получения информации потребуется два акустических канала, что усложняет методику контроля и увеличивает время измерений.

Можно воспользоваться одним акустическим каналом, формируемым преобразователем, наклонённым под нужным углом к поверхности объекта контроля. Обработка полученных эхосигналов производится так же в два этапа: сначала определяется форма поверхности  $t(x)$  по измеренным эхосигналам, затем по тому же набору эхосигналов с учётом профиля поверхности восстанавливается изображение дефектов  $I(\vec{r}_i)$ . В этом случае, время, затрачиваемое на регистрацию отражённых эхосигналов практически в два раза меньше, чем в случае использования двух пьезопреобразователей.

#### **4. Определение профиля поверхности объекта контроля**

Алгоритм определения профиля поверхности основан на анализе эхосигналов  $p(x,t)$  и особенностях поля, излучённого пьезопластиной преобразователя [1]. Излучаемое поле приближённо можно представить как сумму поля, излучённого центральной частью пьезопластины (на Рис. 2 отмечено линиями красного цвета), и поля излучённого краями пьезопластины (на Рис. 2 отмечено линиями синего цвета). Вид эхосигналов  $p(x,t)$  на Рис. 3 демонстрирует данную особенность излучения. Эхосигналы, излучённые центральной частью пластины, возвращаются обратно только при рассеивании во все стороны на неровностях поверхности объекта контроля. Эхосигналы, излучённые нижним краем пластины, отражаются от поверхности объекта контроля, так, будто были излучены прямым преобразователем. Они имеют достаточно большую амплитуду и регистрируются первыми в пределах временной апертуры.



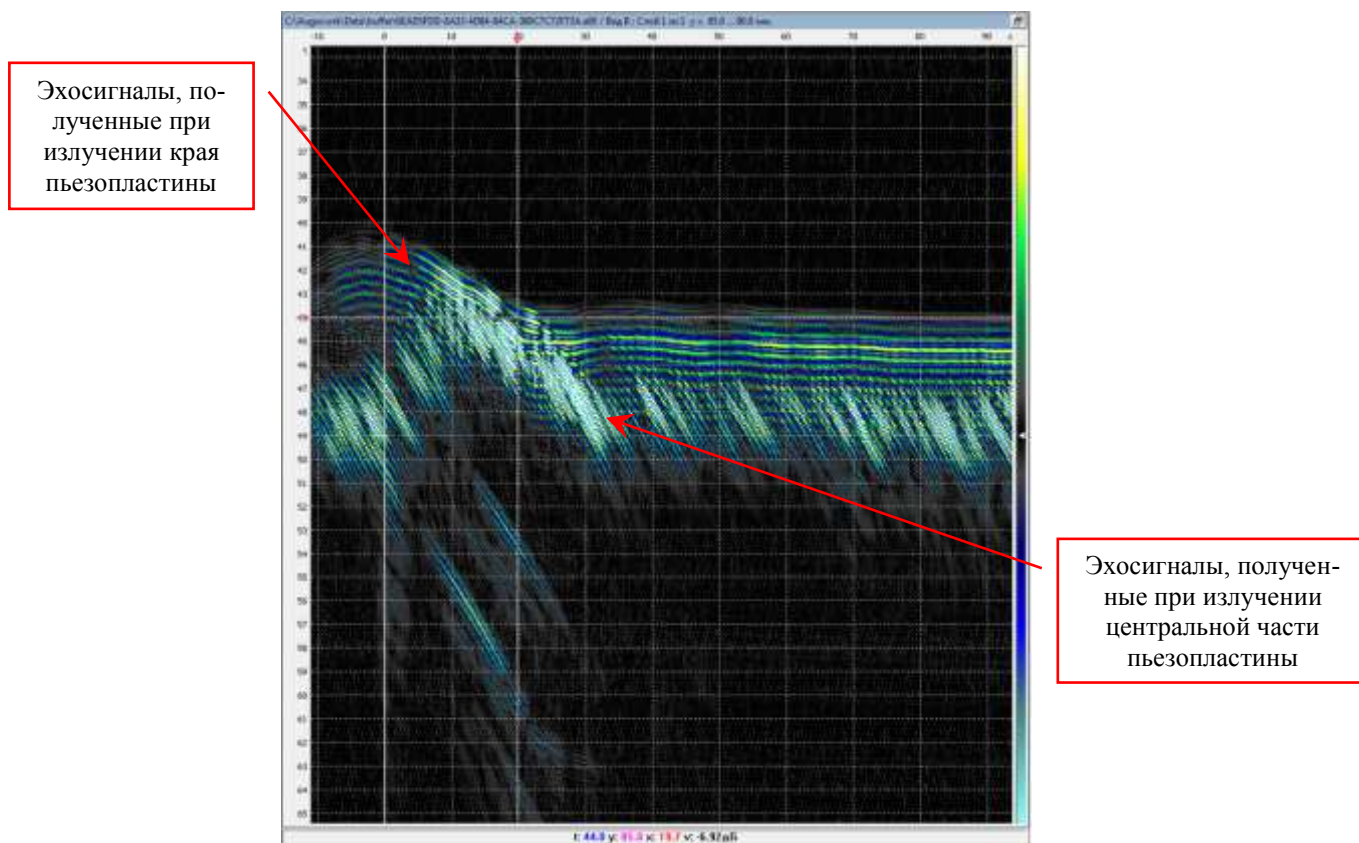


Рис. 3 Вид эхосигналов  $p(x,t)$ , используемых для восстановления профиля поверхности.

Алгоритм получения информации о профиле поверхности состоит из следующих шагов. Для сглаживания эхосигналов  $p(x,t)$  применялась медианная фильтрация только по оси  $x$  по трём отсчётам

$$p_m(x,t) = \underset{[3:1]}{\text{medfilt}}(p(x,t)).$$

Затем по первому превышению эхосигнала уровня  $l_{cut}$  определялось время задержки и, следовательно, расстояние от края пьезопластины до поверхности образца для каждого эхосигнала по формуле

$$l_{cut} = \langle p_m(x,t) \rangle + 3\delta(p_m(x,t)),$$

$$r(x) = \frac{L(p_m(x,t))}{2c_{imm}},$$

где  $c_{imm}$  - скорость звука в иммерсионной среде. Функция  $r(x)$  характеризуется наличием выбросов (Рис. 4), связанных с проблемами определения времени задержки по заданному уровню  $l_{cut}$ , и поэтому рассматривалась как приближённое определение профиля поверхно-

сти. Для устранения этих выбросов рассчитывалась базовая линия  $r_b(x)$ , в виде полинома, аппроксимирующего функцию  $r(x)$ , и те значения  $r(x)$ , которые отличались более чем на  $\lambda_{imm}/4$ , отбрасывались. Это позволило получить функцию  $r_s(x)$  без выбросов, пример которой показан на Рис. 4 справа в виде точек, отмеченных окружностями чёрного цвета. Результирующее значение профиля  $r_o(x)$  (линия красного цвета на Рис. 4 справа) определено после интерполяции  $r_s(x)$  на заданную сетку по оси  $x$ .

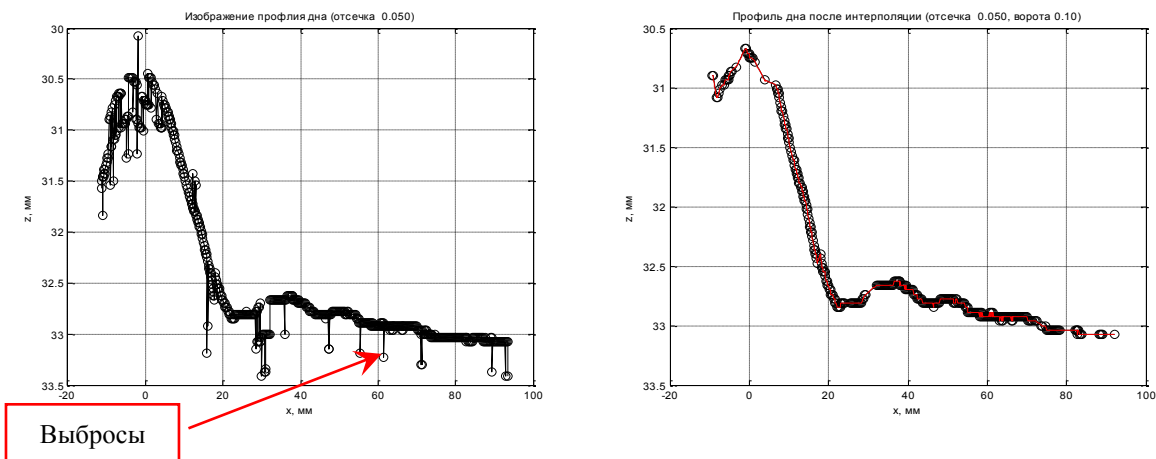


Рис. 4 Определение профиля поверхности объекта контроля.

На следующем шаге нужно определить сдвиги  $(x_{shift}, z_{shift})$  по осям  $x$  и  $z$ , позволяющие «привязать» профиль поверхности  $t(x)$  к положению преобразователя. Функция  $t(x) = r_s(x - x_{shift}) - z_{shift}$  и будет использоваться в алгоритме SAFT (формула (3)) для восстановления изображения дефектов. Для этого построим функцию корреляции  $R(x_{shift}, z_{shift})$  между функцией  $t(x)$  и изображением  $I_s(x, z)$  поверхности объекта контроля

$$R(x_{shift}, z_{shift}) = \int I_s(x, z) \delta(x - x_{shift}, r_s(x - x_{shift}) - z_{shift}) dx dz. \quad (4)$$

Отметим, что изображение  $I_s(x, z)$  получено по эхосигналам, излучённым поверхностью пьезопластины. Значения  $(x_{shift}, z_{shift})$ , которые доставляют функции  $R(x_{shift}, z_{shift})$  максимум, и есть искомые параметры, которые позволяют определить профиль поверхности объекта контроля по формуле

$$t(x) = r_s(x - x_{shift}) - z_{shift}. \quad (5)$$

На Рис. 5 показано изображение поверхности  $I_s(x, z)$  и профиль  $t(x)$ , определённый по рассмотренному в данном разделе алгоритму.

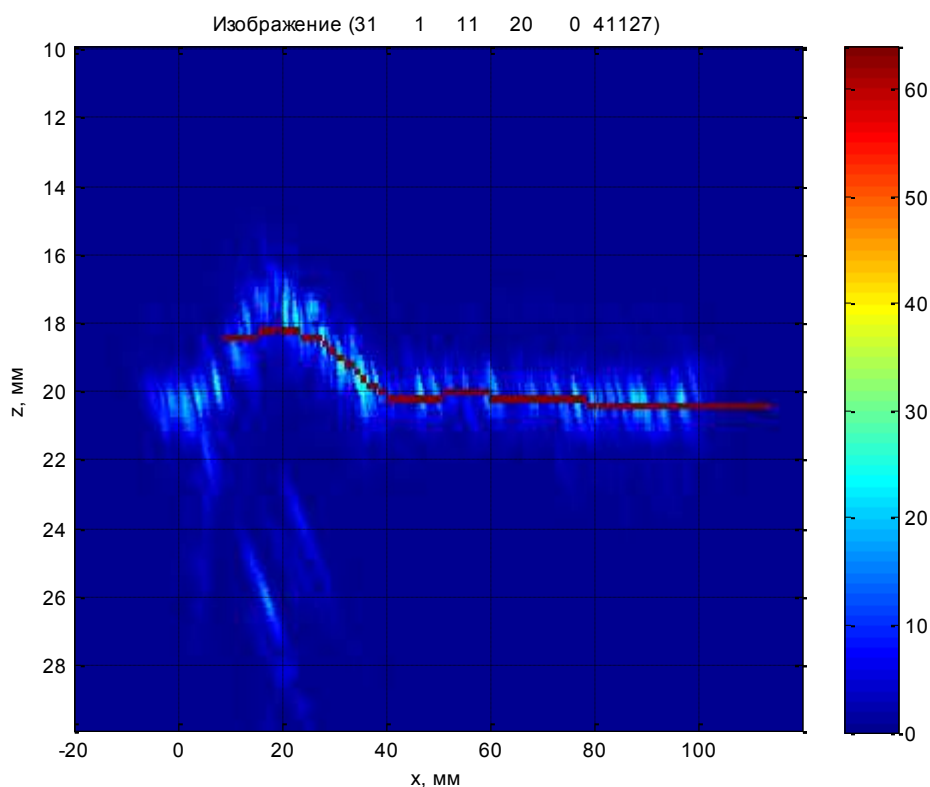


Рис. 5 Восстановленный профиль поверхности  $t(x)$ . Красным цветом изображён профиль поверхности, наложенный на восстановленное изображение поверхности.

## 5. Модельные эксперименты

Модельные эксперименты проводились на двух образцах трубопровода Ду800 с использованием в качестве иммерсионной среды воды и «акваполимера», который представляет собой эластичный полимер на кремнийорганической основе. Акустические свойства «акваполимера» следующие:

Коэффициент затухания на 2.5 МГц  $0.08 \text{ мм}^{-1}$ .

Скорость продольной волны  $1 \text{ мм/мкс}$ .

Для сравнения можно привести значение коэффициента затухания ультразвука в воде равно  $0.0002 \text{ мм}^{-1}$ .

Измерения эхосигналов и восстановление изображений проводились на установке «Авгур 5.4», предназначенной для калибровки пьезопреобразователей и для проведения экспериментов по разработке методик ультразвукового контроля.

### 5.1. Измерения на образце с неровной поверхностью заданной формы

Для проведения испытаний был изготовлен специальный тест-образец толщиной 38 мм с неровным профилем поверхности, имитирующим валик усиления и предваликовую впадину (Рис. 6). В образце было просверлено четыре сквозных отверстия бокового сверления диаметром 2 мм, пронумерованных на рисунке цифрами от одного до четырёх.

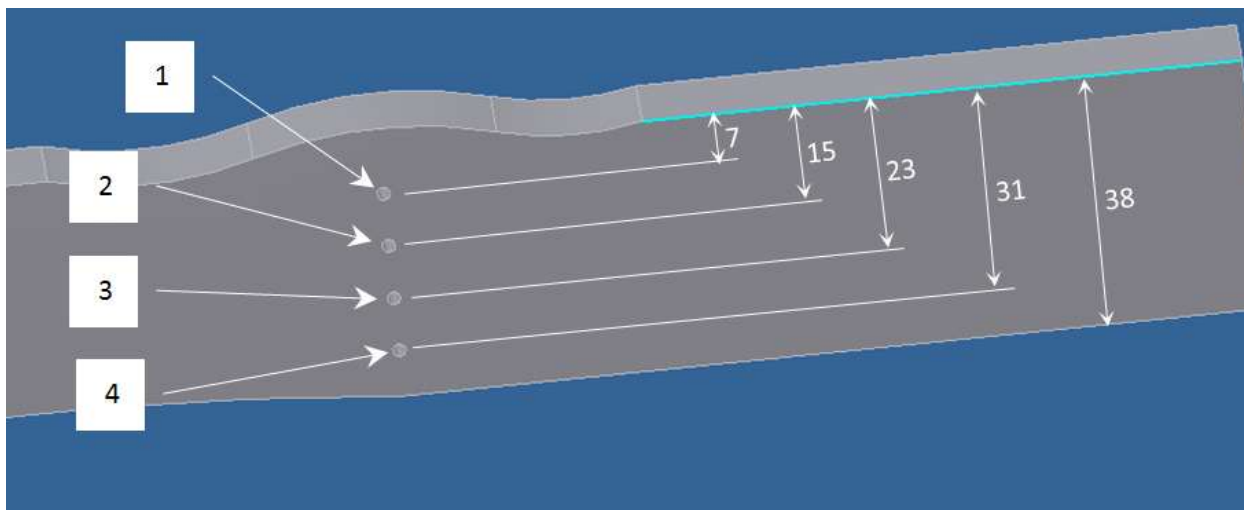


Рис. 6 Тест-образец с неровной поверхностью с четырьмя отверстиями бокового сверления диаметром 2 мм.

#### 5.1.1. Проверка работы алгоритма восстановления профиля поверхности

Для проверки эффективности предложенного алгоритма (см. раздел 4) профиль поверхности тест-образца был восстановлен для нескольких типов иммерсионных сред. Результат восстановления представлен на Рис. 7. Кривая с названием «вода» получена, когда в качестве иммерсионной среды толщиной 20 мм использовалась вода, а для излучения и приёма ультразвука применялся прямой преобразователь, наклонённый под углом 20 градусов к поверхности объекта контроля. График именованный как «вода 2» полностью повторяет кривую «вода» за исключением лишь того, что преобразователь был под прямым углом к поверхности объекта контроля. При построении кривой «аква» в качестве иммерсионной среды использовался «акваполимер» толщиной 20 мм и прямой преобразователь, наклонённый под углом 20 градусов к поверхности тест-образца. Форма поверхности, измеренная при помощи лупы ЛИ-3-10 с точностью 0.1 мм, имеет название «оптический». Ось  $x$  совпадает

с линией перемещения преобразователя вдоль поверхности образца, ось  $z$  – расстояние от пьезопластины до поверхности образца.

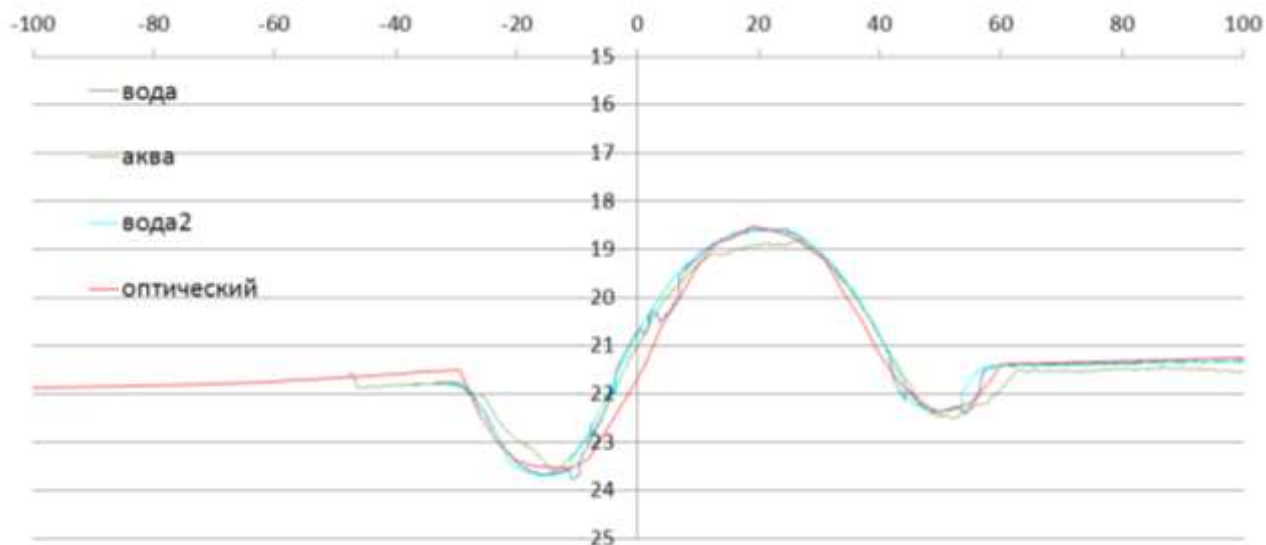


Рис. 7 Сравнение восстановленных профилей поверхности объекта контроля.

Относительно оптического типа определения профиля поверхности для других типов были рассчитаны такие параметры, как максимальное отклонение и среднеквадратическое отклонение (СКО). Результаты сравнения приведены в Таблица 1. В скобках указаны величины в пересчёте для длины волны (0.6 мм для воды, 0.4 мм для «акваполимера»).

Таблица 1 Сравнение восстановленных профилей поверхности

Максимальное отклонение	СКО	Тип иммерсионной среды
0.92 (1.53 $\lambda$ )	0.28 (0.46 $\lambda$ )	вода 2 (угол падения 0 градусов)
0.99 (1.66 $\lambda$ )	0.25 (0.42 $\lambda$ )	вода (угол падения 20 градусов)
0.71 (1.78 $\lambda$ )	0.3 (0.75 $\lambda$ )	«акваполимер»

Из таблицы следует, что точность восстановления формы поверхности всеми предложенными способами примерно одинакова. Среднеквадратическое отклонение от профиля «оптический» меньше длины волны позволяет надеяться, что информацию о поверхности при использовании «акваполимера» в качестве иммерсионной среды, можно использовать при восстановлении изображений дефектов.

## 5.2. Восстановление изображения при использовании воды в качестве иммерсионной среды

При измерениях использовался прямой пьезопреобразователь с углом наклона 20 градусов относительно нормали к ровной поверхности тест-образца. Слева на Рис. 8 представлено изображение отверстий бокового сверления, при восстановлении которого информация о профиле поверхности объекта контроля не использовалась, то есть поверхность полагалась прямой. Хорошо видно, что при восстановлении изображения без учёта профиля поверхности изображения дефектов не сфокусировались. Справа на Рис. 8 представлено изображение, полученное при учёте профиля поверхности, на котором блики советующие отверстиям бокового сверления, отмеченные выносками с номерами от 1 до 4, сфокусировались в нужных местах. На изображение линиями красного цвета наброшена маска тест-образца.

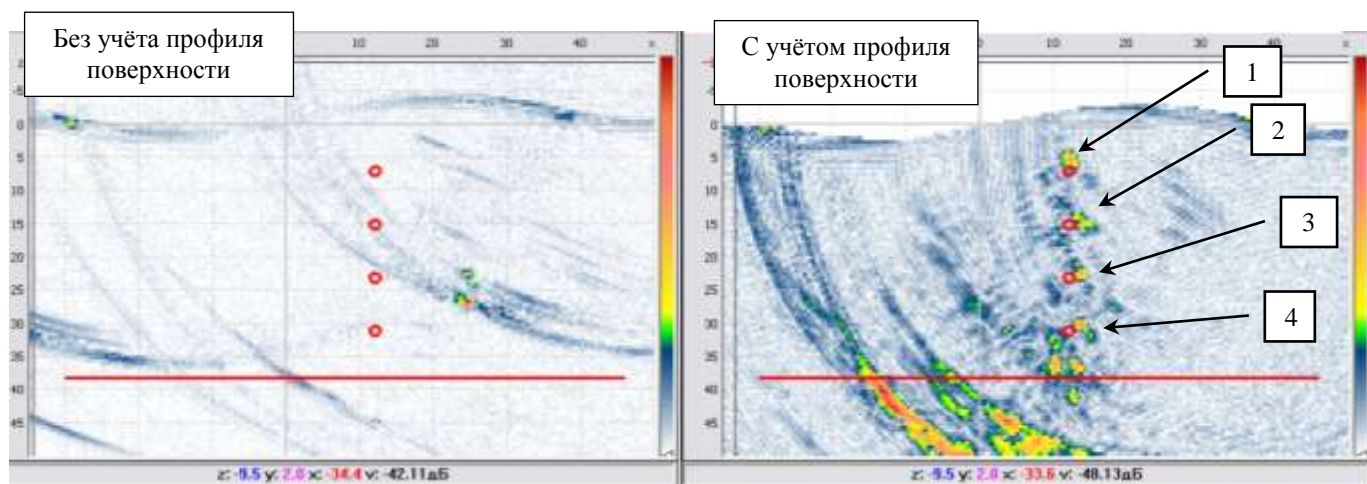


Рис. 8 Восстановление методом SAFT изображения отверстий бокового сверления в тест-образце без учёта профиля поверхности (слева) и с учётом (справа).

### 5.3. Измерения на образце из реального трубопровода Ду800

В следующих модельных экспериментах использовался тест-образец, изготовленный из реального фрагмента трубопровода толщиной 40 мм с неровным профилем поверхности – с валиком усиления и выемкой перед ним, полученной при подготовке поверхности к контролю. В образце были сделаны три отверстия бокового сверления диаметром 3 мм на глубинах 10, 20 и 30 мм, отмеченные на Рис. 9 выносками.

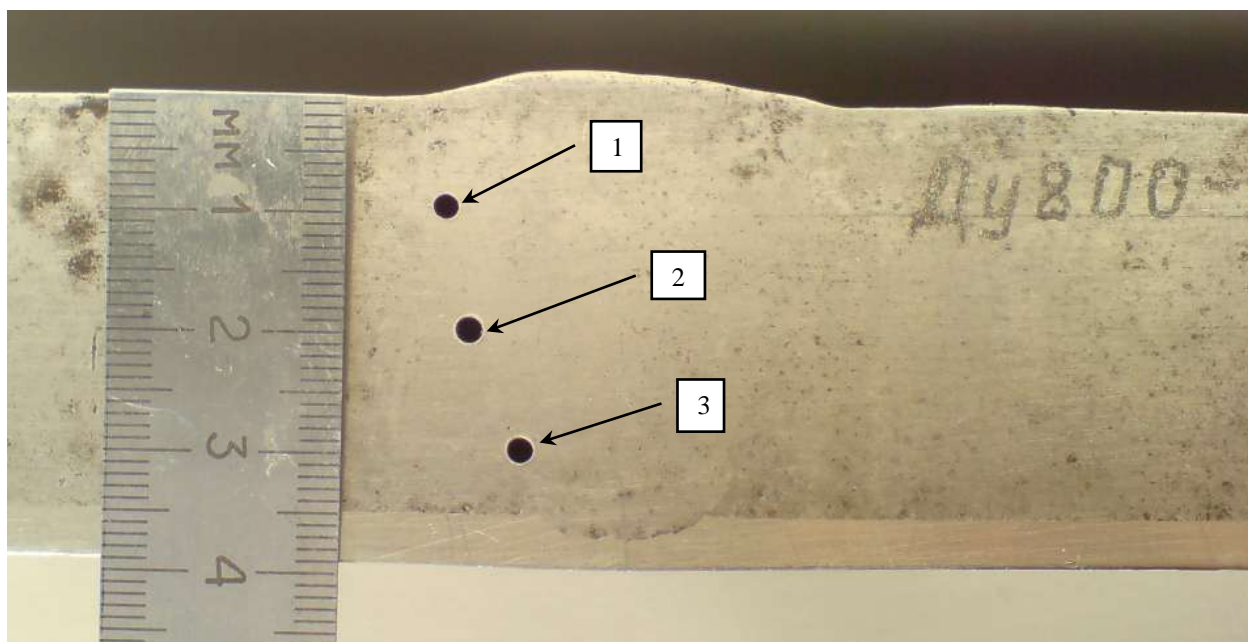


Рис. 9 Изображение образца полученного из реального трубопровода Ду800.

#### 5.3.1. Восстановление изображения при использовании воды в качестве иммерсионной среды

Измерения иммерсионным способом проводились прямым преобразователем с углом наклона 20 градусов к нормали к ровной поверхности образца. На Рис. 10 изображён профиль поверхности образца Ду800 определённый по алгоритму, описанному в разделе 5.1.1. Следует отметить, что даже при удалении от валика усиления с выемкой перед ним, поверхность образца не прямая (линия зелёного цвета на Рис. 10) и имеет неровность около 0.25 мм или 0.42 длин волн в воде.



Рис. 10 Профиль поверхности образца Ду800.

На Рис. 11 слева представлено изображение отверстий бокового сверления, восстановленное методом SAFT без учёта неровной поверхности, а справа с учётом профиля поверхности. Изображение отверстия 1 сфокусировалось, как с учётом профиля поверхности, так и без учёта профиля поверхности. Это обусловлено тем, что принятые эхосигналы от дефекта 1 формируются на малом участке поверхности образца, которую в силу её малости можно полагать ровной. Изображение от дефекта 2 должно сфокусироваться на глубине 21 мм, но без учёта неровной поверхности блик рассыпался на три блика. Блик самой большой амплитуды расположен на глубине 15.5 мм. Изображение от дефекта 3 должно сфокусироваться на глубине 31 мм, но распалось на несколько бликов. И только на изображении, полученном с учётом неровного профиля поверхности, блики распложены в нужных местах и хорошо сфокусированы (Рис. 11, справа). На изображение линиями красного цвета наброшена маска образца.



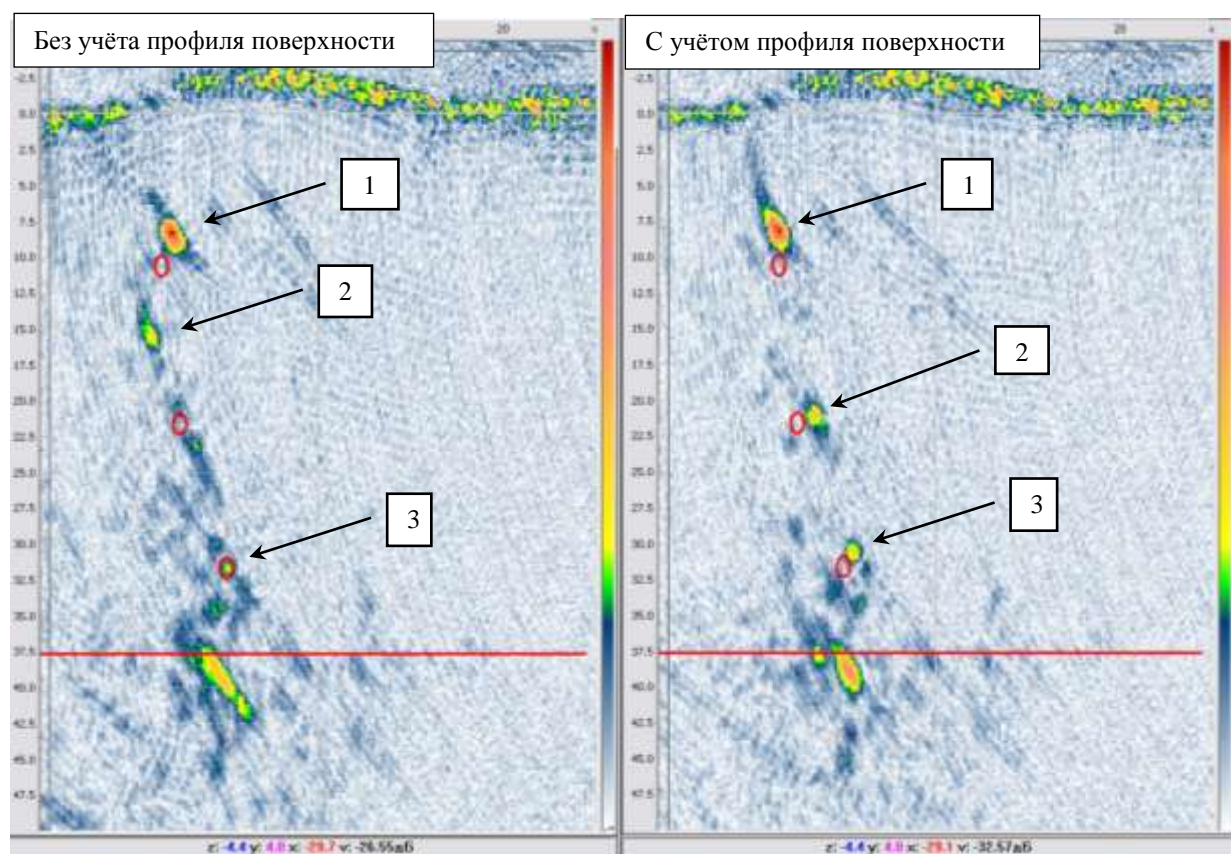


Рис. 11 Восстановление методом SAFT изображения отверстий бокового сверления в образце Ду800 без учёта профиля поверхности (слева) и с учётом (справа). В качестве иммерсионной среды использовалась вода.

### 5.3.2. Восстановление изображения при использовании «акваполимера» в качестве иммерсионной среды

На Рис. 12 представлено изображение отверстий бокового сверления, восстановленное методом SAFT в образце Ду800 по эхосигналам, измеренным с применением «акваполимера» в качестве иммерсионной среды. Изображение дефекта 1 на рисунке слева сфокусировалось в виде блика с малой амплитудой и на другой глубине залегания. Изображение дефекта 2 на рисунке слева расфокусировалось на четыре отдельных блика. Изображение дефекта 3 смещено вдоль поверхности объекта контроля. На изображение линиями красного цвета наброшена маска образца. Изображение дефектов на Рис. 12 полученное с учётом профиля поверхности, свидетельствует о том, что «акваполимер» пригоден для проведения контроля, а алгоритм учёта профиля поверхности работает для варианта иммерсионной среды, как в виде воды, так и в виде «акваполимера».

Обеспечение стабильного акустического контакта при проведении автоматизированного ультразвукового контроля и получение изображений дефектов методом SAFT, учитывающим неровную поверхность объекта контроля

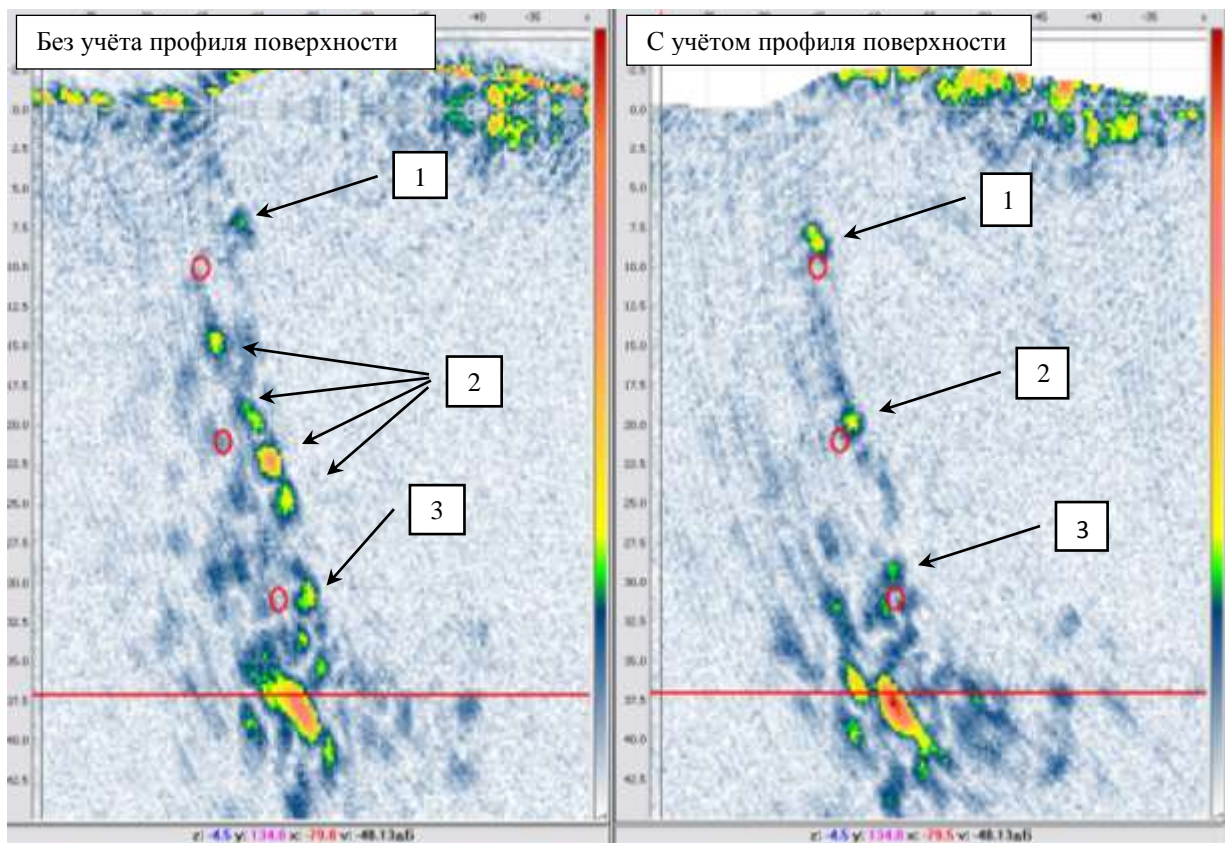


Рис. 12 Восстановление методом SAFT изображения отверстий бокового сверления в образце Ду800 без учёта профиля поверхности (слева) и с учётом (справа). В качестве иммерсионной среды использовался «акваполимер».

## **6. Выводы**

Подводя итоги изложенных в статье результатов исследований, можно сделать следующие выводы:

- Показана возможность применения «акваполимера» в качестве иммерсионной среды;
- Разработан алгоритм определения профиля поверхности объекта контроля по измеренным эхосигналам;
- Предложена модификация алгоритма SAFT, учитывающего профиль поверхности объекта контроля при иммерсионном режиме регистрации эхосигналов;
- Модельные эксперименты показали работоспособность предложенных алгоритмов, как для традиционного варианта иммерсионной среды в виде воды, так и в виде «акваполимера».

## 7. Список литературы

- 1 Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
- 2 Пасси Г.С. Сравнение способов оценки акустического контакта. – Дефектоскопия, 1988, №4, с. 71-78.
- 3 Гурвич А. К., Критская М.В., Лернер Е.С., Пасси Г.С., Сирота Д.Н., Старунов Б.П. Приставка к ультразвуковому дефектоскопу для слежения за состоянием акустического контакта. - Дефектоскопия, 1983, № 10, с. 67-71.
4. Casula O., Poidevin C., Cattiaux G., Dumas Ph. Ultrasonic Nondestructive Testing of Complex Components with Flexible Phased-Array Transducers, ECNDT, 2010.
5. Thomson, R.N. A Portable System for High Resolution Ultrasonic Imaging on Site. - British Journal of Non-Destructive Testing. - 1984, Vol. 26, № 7, p. 281-285.
6. Johnson, J.A, Barna, B.A. The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging. - IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. - 1983, Vol. 30, Issue 5, p. 283-294.
7. Плис А.И., Бабин М.В., Железняков В.А. К вопросу о прямом восстановлении пространственной структуры акустических источников. - Письма в ЖТФ, 1981, Т. 8, № 2, с. 83-86.
8. Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. - М.: Издательство МГУ, 1989. 152 с.
9. Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980. 304 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд. 2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
11. Крауткремер Й., Крауткремер Г., Ультразвуковой контроль материалов. Справочное издание. М: Металлургия, 1991. 752 с.
12. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
13. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля. - Дефектоскопия, 2011, №1, с. 39-56.