

## Оценка результатов контроля по акустическим изображениям

Бадалян В.Г. (НПЦ «Эхо+»)

Рассмотрены общие принципы построения томографических изображений, которые формируются системами с когерентной обработкой данных; проанализированы их характерные особенности. Показано, что оценка реальных параметров дефектов по их акустическим изображениям состоит из нескольких этапов: выделение в трехмерном изображении внутреннего объема контролируемого объекта элементов изображения, принадлежащих несплошности, определения типа выявленной несплошности, измерения параметров несплошности: ее длины, профиля (высоты в различных сечениях по длине), локализации. Подробно проанализированы отдельные этапы оценки параметров дефектов и сформулирован ряд общих признаков, которые используются при выполнении этих этапов. Приведены таблицы, характеризующие особенности акустических изображений для различных типов дефектов. Таблицы проиллюстрированы типичными изображениями различных дефектов в сварных швах трубопроводов различных диаметров. Отмечено, что амплитуда изображения не играет решающей роли для определения типа и реальных параметров дефектов.

### 1. Введение

Автоматизированные системы УЗ контроля все более широко используются при неразрушающем контроле потенциально опасных объектов. Их применение дает хорошие результаты с точки зрения объективности обнаружения дефектов, определения их координат, условной протяженности и эквивалентных размеров [1,2]. Этими же преимуществами обладают и автоматизированные системы с цифровой когерентной обработкой данных. Особенностью таких систем является возможность дополнительного определения реальной длины, высоты и, если это необходимо, профиля дефекта за счет когерентной обработки данных. Характерным представителем таких приборов являются системы серии Авгур.

Одним из ключевых этапов эксплуатации таких систем является процедура оценки полученных акустических изображений с целью определения типа дефектов и измерения их реальных размеров. При обычном контроле оценка его результатов, определение важности деталей изображения, особенности поведения эхо – сигналов и изображений дефекта, его амплитуды, положения в шве и т.д. в значительной степени зависят от массы знаний, основанных на компетенции специалиста, осуществляющего контроль и оценивающего полученные результаты. Это связано с двумя обстоятельствами, во-первых приходится решать обратную задачу – по измерениям акустического поля, отраженного или рассеянного несплошностью, а, как известно, обратные задачи – это часто некорректные задачи, которые могут не иметь единственного решения. Во-вторых, акустические изображения несплошности, чаще всего, слабо коррелируют со своим оптическим образом. Поэтому роль специалиста, оценивающего результаты на основе некоторых правил и опыта, представляется очень важной.

В работе рассмотрены возможности классификации несплошностей по их когерентным изображениям, полученным с использованием систем серии Авгур, которые используют основные, устойчивые признаки, характеризующие несплошность – ее наличие, реальные параметры, профиль несплошности, тип несплошности: протяженные, непротя-

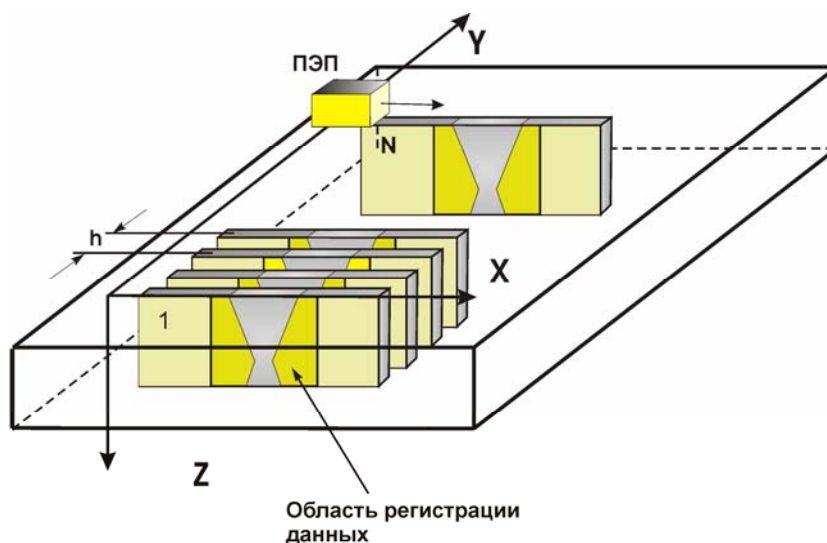
женные, нитевидные, протяженные объемные или плоские; основные принципы определения размеров дефектов. Заметим, что основные признаки несплошностей, характерные для когерентных изображений, полученных системами серии Авгур справедливы и для когерентных изображений, полученных с использованием других томографических систем УЗК, таких как, например системы с фазированными антенными решетками [3,4], либо использующих SAFT обработку данных [5].

## 2. Общие принципы формирования томографических изображений в системах с когерентной обработкой данных.

Особенности изображений, формируемых в результате обработки данных, в значительной степени зависят от особенностей их регистрации системами неразрушающего контроля. Мы рассмотрим их на примере системы с когерентной обработкой данных серии Авгур. Регистрация данных в ней осуществляется при двумерном сканировании ПЭП для получения трехмерного изображения с высоким разрешением за счет применения когерентных алгоритмов обработки данных с последующей оценкой параметров несплошности. Используя двумерное сканирование, можно получить данные о рассеянном поле двумя способами. Первый способ – томографический (послойная регистрация данных). Второй способ – подробная регистрация рассеянного поля в двумерной области.

Применение каждого из этих способов регистрации данных требует различных режимов сканирования и использования различных типов акустических преобразователей.

Томографическая регистрация данных предполагает регистрацию данных в контролируемом объеме сварного шва (изделия) в виде набора слоев, каждый из которых представляет собой запись акустического поля в координатах  $X$  (перемещение преобразователя по координате  $X$ ) – время (рис.1).



**Рис. 1.** Томографическая схема регистрация данных, принятая в системах серии Авгур.

Здесь акустический преобразователь перемещается с малым шагом  $\Delta l \sim \lambda/5$  перпендикулярно сварному шву (ось  $X$ ), как показано стрелкой, тогда как перемещение вдоль сварного шва (ось  $Y$ ) осуществляется с большим шагом  $\Delta h$ . Пространственное расстояние между слоями должно быть таково, чтобы слои рассматривать как независимые. Однако, для увеличения достоверности контроля, обычно шаг  $\Delta h$  между слоями выбирается  $\sim L/3$ , где  $L$  – размер пьезоэлемента. Поэтому, используются ПЭП с узкой, характерной для дефектоскопии, диаграммой направленности в плоскости  $(YZ)$  и широкой, характерной для когерентной обработки, – в перпендикулярной плоскости  $(XZ)$ .

Другой способ регистрации данных, предполагает измерение рассеянного акустического поля в двумерной области с шагом  $\sim \lambda/5$  по двум взаимно перпендикулярным на-

правлениям (по осям  $X$  и  $Y$ ). При этом существенно возрастают требования к системе сканирования, так как в этом случае малый шаг необходимо обеспечить по обеим осям; акустические преобразователи должны иметь широкую диаграмму направленности во всех направлениях. Полученные по этим данным изображения имеют максимальное разрешение по всем трем пространственным осям. Однако это приводит не менее чем к 30-ти кратному возрастанию времени регистрации и объема регистрируемых данных по сравнению с послойной регистрацией данных; требуются специальные способы хранения, структурирования; возможности быстрого доступа и просмотра данных. Кроме того, резко возрастают требования к применяемому компьютеру с точки зрения быстродействия, объема оперативной памяти. Выигрыш в надежности оценки параметров дефектов по их изображениям, полученным при трехмерной регистрации и при послойной регистрации весьма неочевиден. Поэтому, обычно, при выполнении работ в промышленности используется томографическая регистрация данных.

Изображения, подлежащие анализу, в соответствии со структурой зарегистрированных данных, представляют собой набор изображений  $B$  – типа из которых формируются изображения  $C$  и  $D$  – типа. Схема формирования изображений различного типа по данным послойной регистрации рассеянного акустического поля в системе с когерентной обработкой данных Авгур приведена на рис. 2. Подчеркнем, что изображение  $B$  – типа имеет высокое разрешение по осям  $X$  (определяется когерентной обработкой данных) и  $Z$  (определяется длительностью зондирующего импульса); изображения  $C$  – типа и  $D$  – типа, являясь комбинированными изображениями, имеют высокое разрешение по осям  $X$ ,  $Z$  и низкое разрешение вдоль оси  $Y$ , определяемое шагом сканирования  $\Delta h$ .

На врезках рис. 2 приведен схематичный вид дефекта в виде подповерхностной трещины для разных типов изображений.

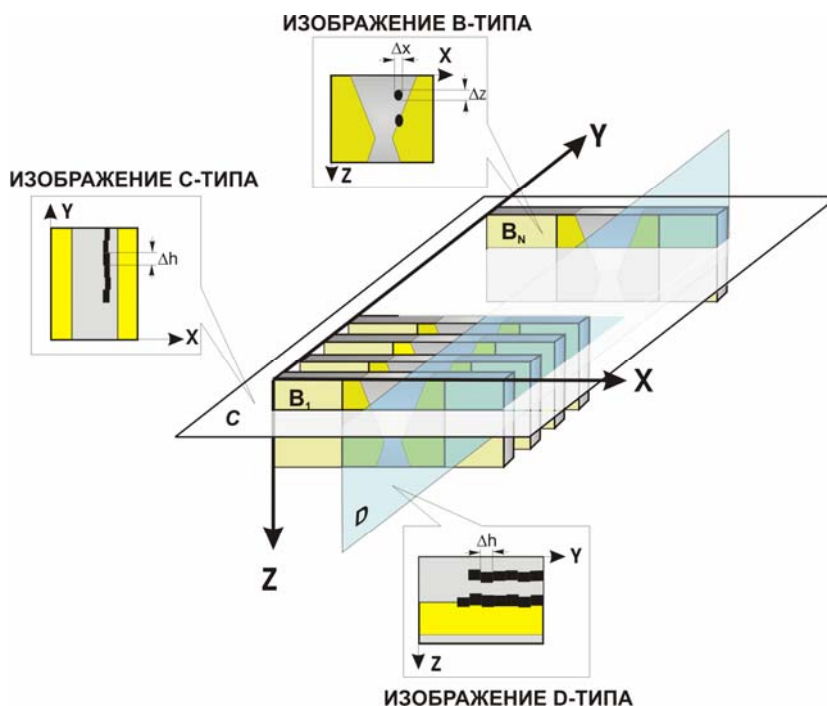
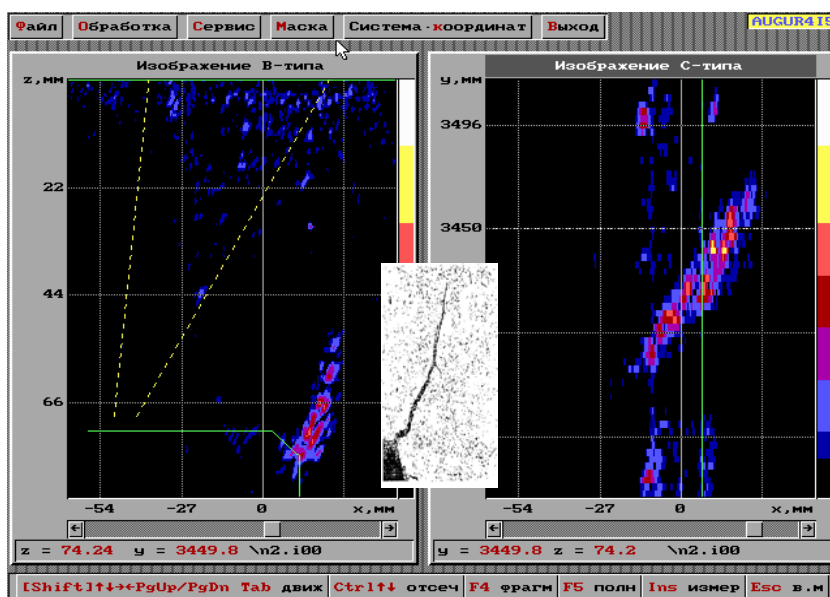


Рис. 2. Схема формирования изображений в системе Авгур.

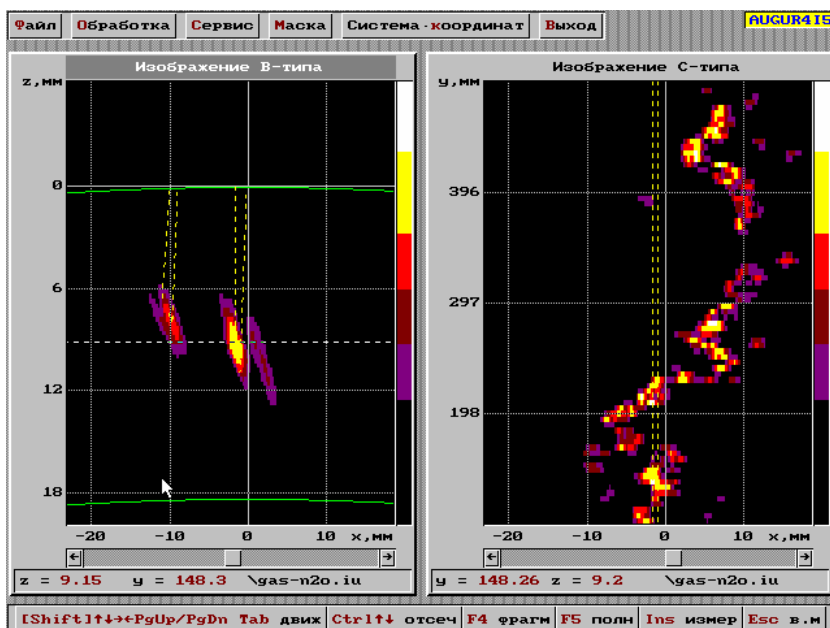
### 3. Характерные особенности томографических изображений дефектов в системах с когерентной обработкой данных.

Как уже отмечалось, акустические изображения дефектов мало похожи на их оптический образ, что связано с большой длиной используемых акустических волн, условиями дифракции и отражения акустических волн на неоднородностях, ограничениями алгорит-

мов восстановления изображений, методикой регистрации данных. Вместе с тем, если размеры несплошностей значительно больше длины звуковой волны и расположены благоприятно с точки зрения регистрации рассеянного ими акустического поля, изображения дефектов могут быть весьма близки к своему оптическому образу. На рис. 3 приведены примеры изображений таких дефектов<sup>1</sup>, полученные с применением системы Авгур 4.2.



а)



б)

**Рис. 3.** Изображения дефектов, близкие к их оптическому образу:

а – изображение трещины в основном металле в области радиусного перехода, справа приведена фотография этой трещины, соответствующая В – типу изображения; стрелкой отмечен дефект;

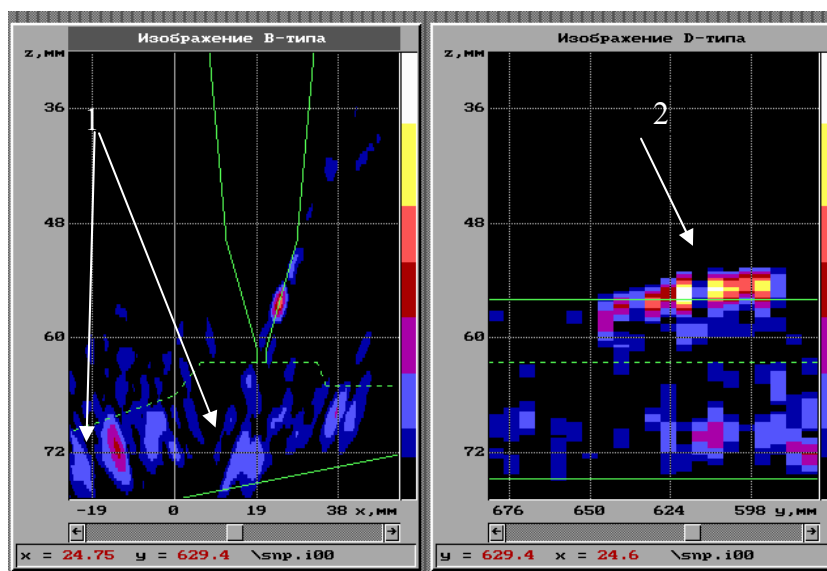
б – изображение стресс – коррозии, справа приведена фотография этой трещины на поверхности, соответствующая С – типу изображения.

<sup>1</sup> Изображения получены П.Ф. Самариным и Д.С. Тихоновым

Сплошными линиями изображены границы контролируемого объекта, пунктирными – разделка сварного шва.

На рис 3а приведено изображение В- и С- типа трещины локализованной в области радиусного перехода вблизи сварного шва. Тонкими линиями показана разделка сварного шва и геометрия контролируемого изделия. Здесь же приведена фотография поперечного сечения этой трещины в масштабе 1:1, растущей из области радиусного перехода (нижний левый угол фотографии). На рис.3б приведено изображение В- и С- типа стресс – коррозионной трещины в трубопроводе диаметром 1200 мм. Справа для сравнения приведена фотография поверхности контролируемого объекта, содержащего стресс – коррозионную трещину в близком масштабе. Необходимо отметить, что акустическое изображение трещины, не повторяя буквально вид трещины с фотографии, тем не менее, сохраняет ее основные характерные особенности, которые остаются и на глубине 9 мм, которой соответствует акустическое изображение.

Приведенные изображения дефектов, хорошо коррелирующие со своим оптическим образом, скорее исключение, чем правило. В подавляющем большинстве случаев, они мало похожи на свой оптический образ. В качестве примера на рис. 4 приведено типичное изображение контролируемого объема сварного шва с аустенитной наплавкой, полученное после когерентной обработки данных.



**Рис. 4.** Изображение протяженного дефекта: изображение В – типа (слева), изображение D – типа (справа); 1 – шумы аустенитной наплавки, 2 – нестабильность акустического контакта. Сплошные контуры – разделка сварного шва, пунктирная линия – граница аустенитная наплавка – основной металл.

На рис. 4 наблюдается изображение протяженного дефекта, расположенного на границе сварной шов – основной металл. Здесь представлены изображения В- и D – типа и приведена схема разделки сварного шва (сплошные линии). Оси X и Y направлены перпендикулярно и вдоль сварного шва соответственно, координата Z определяет глубину залегания неоднородности относительно внешней поверхности трубопровода. Область аустенитной наплавки характеризуется повышенным уровнем структурного шума. На рис. 4 также видны дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при анализе изображений: присутствие акустических шумов от структуры объекта, нестабильность качества акустического контакта при сканировании вдоль сварного шва, связанного со значительной волнистостью поверхности в околошовной зоне.

#### 4. Оценка параметров дефектов по акустическим изображениям.

Процесс оценки результатов акустических изображений, для определения типа и измерения размеров несплошностей можно разбить на три этапа:

1. Выделение совокупности элементов изображения, относящихся к несплошности в полученном когерентном изображении.
2. Определение типа несплошности.
3. Измерение реальных параметров и профиля несплошности.

##### **Выделение несплошности в акустическом изображении.**

Так как любое когерентное изображение, представляет собой совокупность областей («пятен»), в которых амплитуда изображения отлична от нуля, то первая задача, которую необходимо решить – определить наличие несплошности в таком изображении и выделить ее на фоне других «пятен» иной природы, связанных с акустическими шумами, преобразованием акустических волн и т.д.

Анализ изображений, полученных в результате когерентной обработки в реальных условиях контроля, позволяет сформулировать ряд общих признаков характеризующих существование дефекта в выделенном (и визуализированном) объеме сварного шва, большинство из которых наблюдается на рис. 4:

- Изображений несплошности должно наблюдаться не менее чем в двух соседних слоях.

В практике наблюдаются «пропуски» изображения в одном или нескольких слоях. В этом случае, необходимо убедиться, что его отсутствие не связано с отсутствием акустического контакта или другими видами искажения качества данных.

- Изображение несплошности – сфокусированное изображение, так как является результатом когерентной обработки данных.

В этом случае размеры «пятна» изображения должны быть примерно равны величине разрешения по соответствующим осям. В том случае, когда зарегистрирована только часть данных о несплошности, фокусировка может существенно ухудшиться.

- «Пятно» изображения несплошности, наблюдаемое в соседних слоях, может изменять свои координаты не более чем на величину соответствующего разрешения.

Это признак связан с тем, что шаг сканирования вдоль несплошности меньше ширины используемого акустического пучка и маловероятно, что координаты отражающего элемента на несплошности могут меняться очень резко (в реальных условиях, например, высота дефекта, если это не коррозионный дефект, очень редко может измениться на 2 мм по высоте на расстоянии 4 мм по длине).

- При использовании нескольких ПЭП для одной области, несплошность в ней обычно наблюдается в нескольких изображениях, соответствующих различным ПЭП.

Этот признак действует не всегда, так как условия рассеяния УЗ несплошностью могут сильно отличаться для различных ПЭП. Особенно он ненадежен при контроле аустенитных материалов, например, аустенитных сварных швов трубопроводов диаметром 325x15 мм. Это связано с особенностями распространения УЗ волн в аустените, часто имеющем дендритную структуру [6-8], которая приводит к значительной рефракции акустических волн.

- Амплитуда изображения несплошности больше амплитуды шумового изображения.
- В случае появления зеркального отражения, обычно наблюдается «зеркальное» изображение несплошности.
- Изображение несплошности может сопровождаться изображением, соответствующим трансформированной волне.

Эти изображения расположены на другой глубине и на другой координате по X и всегда хуже сфокусированы. Устойчивое сопровождение изображения несплошности изображе-

нием, связанным с трансформированной волной в нескольких слоях является дополнительным признаком наличия несплошности.

Заметим, что существенно упрощает анализ использование в изображении маски разделки сварного шва. Маска строится с использованием априорной информации о геометрии сварного шва.

#### **Определение типа несплошностей.**

После выявления в изображении несплошности необходимо определить ее тип: протяженная или непротяженная, объемная или плоская. Необходимо отметить, что решение даже такой несложной задачи как отнесение несплошности к протяженной или непротяженной чрезвычайно затруднено при анализе лишь одного (любого) изображения В – типа, которое получено при когерентном восстановлении изображений, так как только рассмотрение набора изображений В – типа, составляющего трехмерное изображение контролируемого объема изделия (рис. 2) позволяет уверенно решить эту задачу. Ниже приводятся основные, устойчивые признаки типов несплошностей, которые использовались при анализе акустических изображений, полученных в системах серии Авгур с использованием методик контроля, написанных для работ с этими системами [9-10]:

- **несплошность непротяженная:**
  - (а) существует не более чем в 2-3 соседних слоях;
- **несплошность протяженная:**
  - (а) существует более чем в 3 соседних слоях.

Возможны пропуски изображения в отдельных слоях за счет нарушения акустического контакта, либо за счет ухудшения условий отражения;

- **несплошность объемная (включения):**
  - (а) иногда имеет дополнительные изображения, связанные с преобразованием акустических волн, расположенные на большей глубине, обычно хуже сфокусированные, чем основное изображение,
  - (б) обычно не затеняет изображения геометрических отражателей или других несплошностей, расположенных дальше за ним в направлении акустического пучка;
- **несплошность плоская (трещины, несплавления):**
  - (а) существует более чем в 3 соседних слоях.

Возможны пропуски изображения в отдельных слоях за счет нарушения акустического контакта, либо за счет ухудшения отражения;

- (б) изображение несплошности в каждом слое часто представляет собой синхронную совокупность 2 и более независимых «пятен»,
- (с) возможно (при достаточной высоте несплошности) затенение изображения геометрических отражателей или других несплошностей, расположенных дальше за ним в направлении акустического пучка.

Более детальное различение несплошностей по их типам приведено в таблицах 1 – 3. Здесь величина разрешения рассматриваемых изображений по осям Y, X и Z обозначены как  $\Delta L$ ,  $\Delta x$  и  $\Delta z$ , соответственно. В соответствии с методиками контроля, используемыми с системами Авгур величина разрешения  $\Delta L$  равна приблизительно 3 слоям вдоль

**Таблица 1. Основные признаки непротяженной несплошности в сварных швах по когерентным изображениям**

Тип несплошности		Длина, L	Высота, b	Локализация относительно сварного шва	Особенности изображений	Примечание	Схематическое представление изображения
Объемная		Не менее $\Delta L$	Не менее $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	На изображениях В-, С-, D- типа обычно наблюдается одно "пятно"	В ряде случаев, когда границы несплошности гладкие, наблюдаются изображения, связанные с волнами обегания- соскальзывания	В-тип 
							С-тип 
Плоскостная	Несплавление по кромке	Не более $\Delta L$	на менее $\Delta z$	Локализация вблизи линии сплавления сварной шов - основной металл.	В изображении В-типа, как правило, наблюдаются два пятна. При высоте дефекта в несколько длин волн между двумя пятнами могут наблюдаться дополнительные элементы изображения.	При определении типа несплошности используется информация о ее положении относительно элементов разделки сварного шва	В-тип 
	Межваликовое несплавление			Локализация внутри сварного шва.			С-тип 
	Непровар			Локализация в корне X или Y-образного шва.			D-тип 

Таблица 2. Основные признаки протяженной объемной несплошности в сварных швах по когерентным изображениям





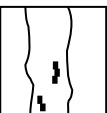
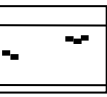

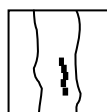

Тип несплошности	Длина, L	Высота, b	Локализация относительно сварного шва	Особенности изображений	Примечание	Схематичное представление изображения
<b>Цепочка непротяженных дефектов</b>	Более $\Delta L$	В пределах (1-3) $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	На изображениях В -, С -, D - типа обычно наблюдается несколько "пятен", каждое длиной не более $\Delta L$ , высотой $\Delta z$ , расстояния между "пятнами" - не менее $\Delta L$ . Координаты "пятен" по X отличаются не более, чем на $\Delta x$ .		В-тип  С-тип  D-тип 
<b>Скопление непротяженных дефектов</b>	Более $\Delta L$	Более $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	На изображениях В -, С -, D - типа обычно наблюдается несколько "пятен", каждое длиной не более $\Delta L$ , высотой $\Delta z$ , расстояния между "пятнами" - не менее $\Delta L$ . Координаты "пятен" по X и Z отличаются не менее, чем на $\Delta x$ и $\Delta z$ , соответственно.		В-тип  С-тип  D-тип 
<b>Включение (шлаковое)</b>	Более $\Delta L$ (может прерываться)	Более $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	В изображении В-типа, наблюдается одно "пятно". В изображениях С- и D-типа наблюдается "линия"	Изображение может иметь несколько локальных максимумов по длине. Фокусировка "пятна" - средняя. Обычно $2b \leq L$	В-тип  С-тип  D-тип 

Таблица 3 Основные признаки протяженной плоскостной несплошности в сварных швах по когерентным изображениям


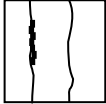


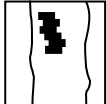

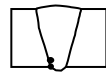
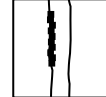

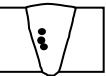


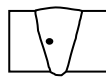
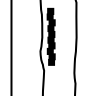

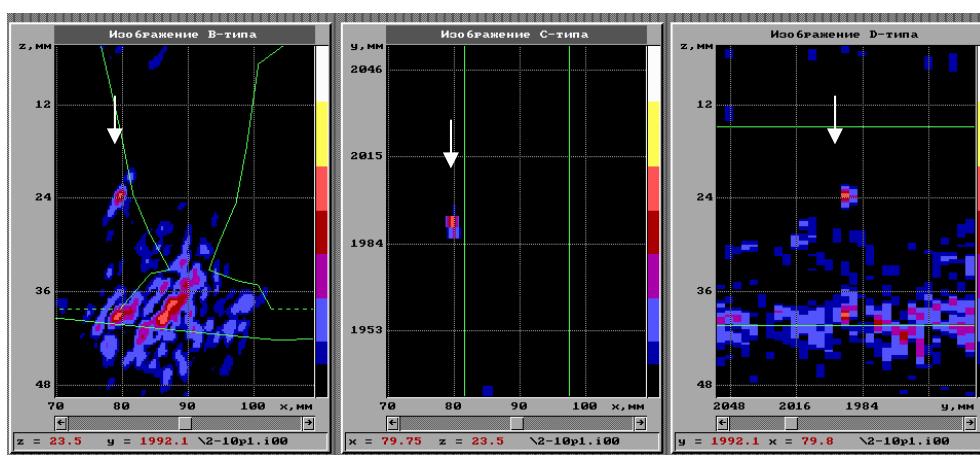
Тип несплошности	Длина, L	Высота, b	Локализация относительно сварного шва	Особенности изображений	Примечание	Схематичное представление изображения
Несплавление по кромке	Более $\Delta L$	Более $\Delta z$	Вблизи линии сплавления шов - основной металл.	В изображении В-типа, иногда, наблюдаются два пятна. В этом случае в изображениях С- и D-типа верхний и нижний концы компланарны	При высоте дефекта в несколько длин волн между двумя пятнами могут наблюдаться дополнительные элементы изображения. Характерное соотношение $b/L \geq 1/7$	В-тип  С-тип  D-тип 
Межваликовое несплавление	Более $\Delta L$	Более $\Delta z$	Внутри сварного шва.	В зависимости от локализации в изображении В-типа могут наблюдаться два пятна с размерами порядка $\Delta x$ и $\Delta z$ , или одно пятно с размерами $\Delta z$ и большими $\Delta x$ . Изображение С - типа может иметь вид двух параллельных "линий" или одной, шириной больше $\Delta x$ и длиной $> \Delta L$	При высоте дефекта в несколько длин волн могут наблюдаться дополнительные элементы изображения.	В-тип  С-тип  D-тип 
Непровар	Более $\Delta L$	Более $\Delta z$	В корне X или Y-образного шва.	В изображении В-типа, как правило, наблюдаются два пятна, одно из которых совпадает с корнем шва. Изображение D - типа имеет вид двух параллельных "линий", одна из которых локализована в области корня сварного шва.	При высоте дефекта в несколько длин волн между двумя пятнами могут наблюдаться дополнительные элементы изображения.	В-тип  С-тип  D-тип 

Таблица 3 Основные признаки протяженной плоскостной несплошности в сварных швах по когерентным изображениям (продолжение).

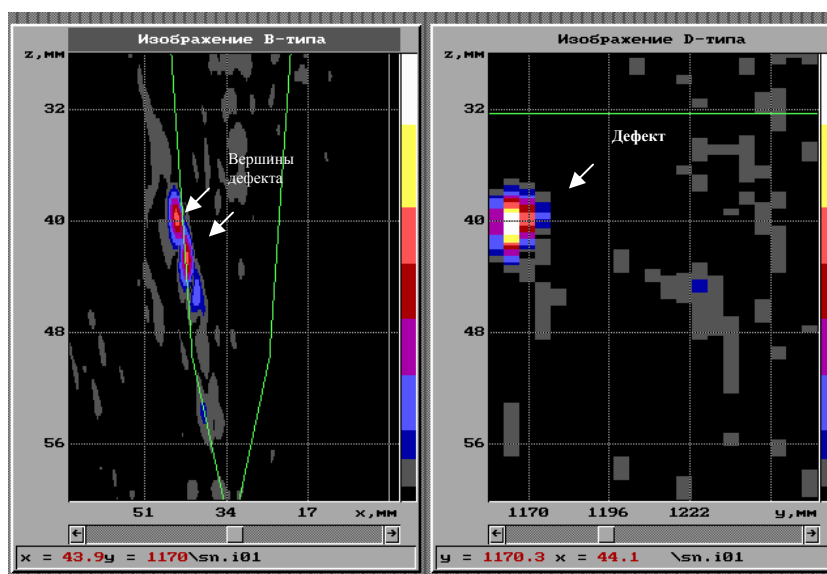
Тип несплошности	Длина, L	Высота, b	Локализация относительно сварного шва	Особенности изображений	Примечание	Схематичное представление изображения
Трещина продольная	Более $\Delta L$	Более $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	В изображении В-типа, как правило, наблюдаются несколько пятен по z. Изображения С и D-типа имеют вид двух извилистых "линий", соответствующих верхнему и нижнему концам. В целом, верхний и нижний концы трещины – компланарны.	При высоте дефекта в несколько длин волн между двумя пятнами могут наблюдаться дополнительные элементы изображения. Часто направления верхних и нижних концов трещины не совпадают с осью Y. Характерное соотношение $b/L \sim 1/12$	<p>В-тип </p> <p>С-тип </p> <p>D-тип </p>
Нитевидная	Более $\Delta L$	В пределах $\Delta z$	В любом месте по глубине и длине шва	В изображении В-типа, наблюдается одно пятно. В изображениях С и D-типа наблюдается "линия"	Изображения объемной протяженной типа шлакового включения и плоскостной нитевидной несплошностей не различаются. Как правило считается, что несплошность плоскостная.	<p>В-тип </p> <p>С-тип </p> <p>D-тип </p>

оси  $Y$ , тогда как величины  $\Delta x$  и  $\Delta z$  определяются поперечным и продольным разрешением когерентного изображения соответственно и составляют величину порядка  $\lambda$ . Отметим, что в таблицах нет признака, характеризующего амплитуду анализируемого изображения. Это связано с тем, что абсолютное значение амплитуды изображения несплошности зависит от множества причин, таких как ее размер, ориентация, локализация в изделии, акустические параметры материала и не может служить надежным признаком.

В таблице 1 приведены основные признаки непротяженных несплошностей в сварных швах по когерентным изображениям, полученным системами серии Авгур. Примеры типичных изображений различных дефектов из таблицы 1 даны на рис 5.



а)



б)

**Рис. 5.** Изображения непротяженных несплошностей (показаны стрелками) в сварных швах трубопроводов с аустенитной наплавкой:

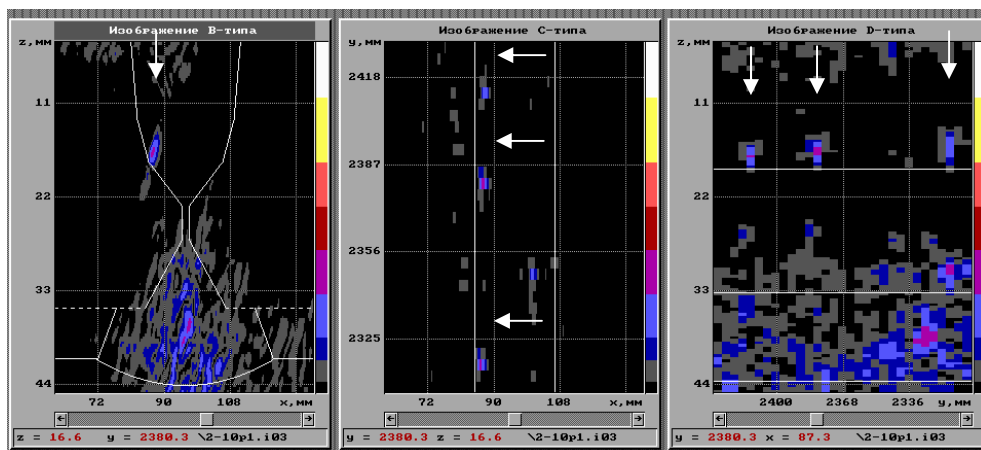
а – изображения В-, С- и D- типа объемной несплошности,

б – изображения В- и D- типа плоскостной несплошности (несплавления по кромке).

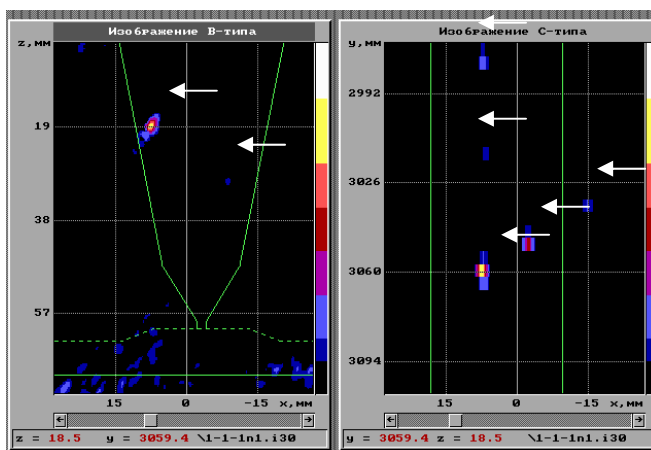
На этих рисунках сама несплошность показана стрелками на всех видах изображений. Здесь же сплошными линиями приведена разделка сварного шва. На рис. 5 а приведены изображения В-, С- и D- типа объемной непротяженной несплошности в сварном шве трубопровода с аустенитной наплавкой. Амплитуда изображения высокая и существенно превышает уровень структурных шумов в аустените. На рис. 5 б приведен пример изображений непротяженной плоскостной несплошности типа несплавления по кромке

На рис. 5 б хорошо видно, что несплавление в виде двух «пятен» расположено на границе сварной шов – основной металл. По расстоянию по оси Z между максимумами этих «пятен» можно оценить высоту дефекта. Здесь же по изображению D- типа можно убедиться, что этот дефект – непротяженный.

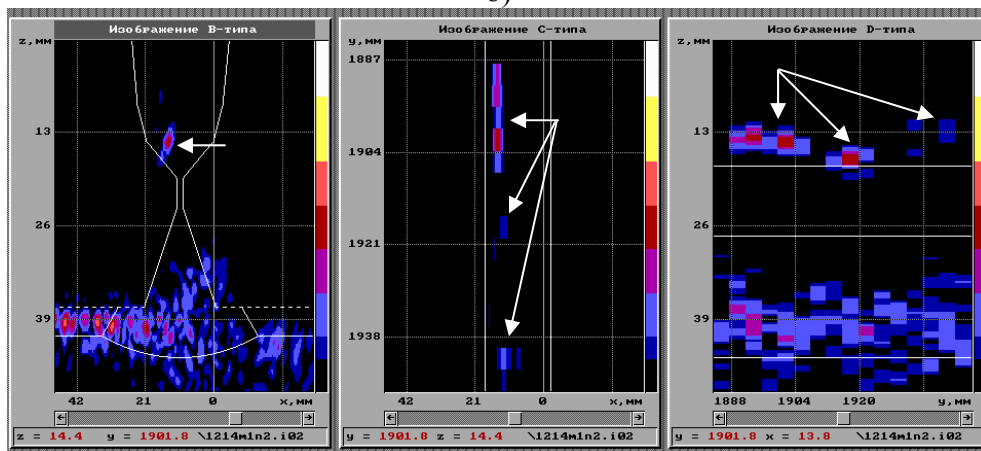
Основные признаки протяженных объемных несплошностей в сварных швах по когерентным изображениям, полученным системами серии Авгур, приведены в таблице 2. Примеры типичных изображений различных типов объемных несплошностей даны на рис.6.



а)



б)



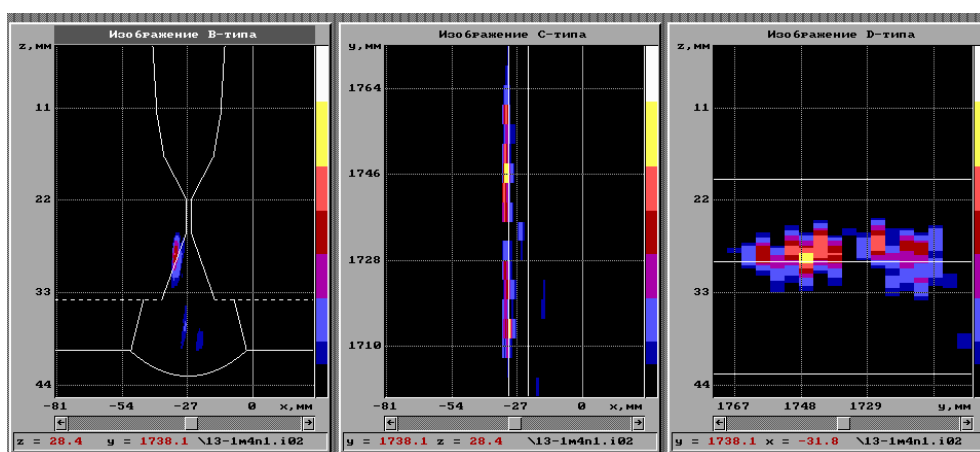
в)

**Рис. 6.** Изображения объемных протяженных дефектов (показаны стрелками) в сварных швах трубопроводов с аустенитной наплавкой:  
а – изображения В – , С – и D – типа цепочки непротяженных дефектов,

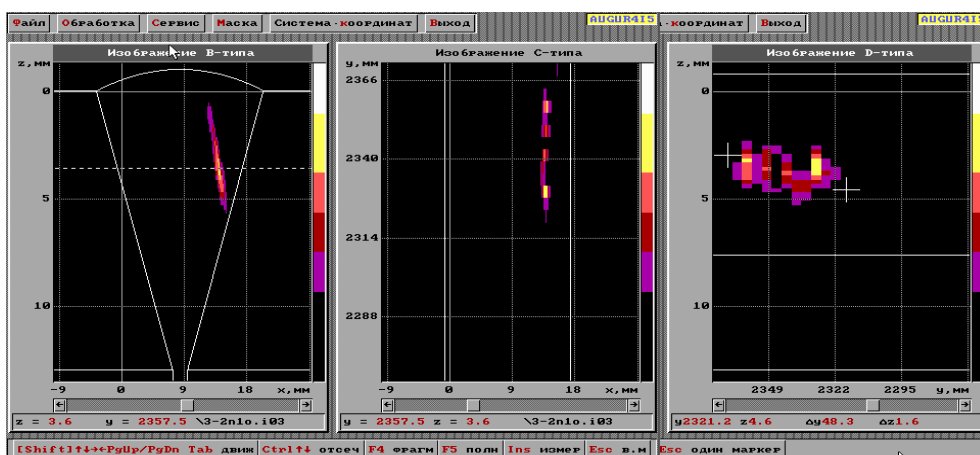
б – изображения В – и С – типа скопления непротяженных дефектов,  
в – изображения В – , С – и D – типа шлакового включения.

Здесь сплошными линиями приведена разделка сварных швов, а стрелками изображения дефектов. На рис.6 а и рис.6 б наблюдается значительное число непротяженных, невысоких дефектов, расположенных как вблизи границы сварной шов – основной металл, так и непосредственно внутри сварного шва (рис.6 б). Приведенное на рис.6 в шлаковое включение имеет значительную длину около 50 мм и при этом его изображение существенно изменяет свою амплитуду, что отображается на цвете изображения.

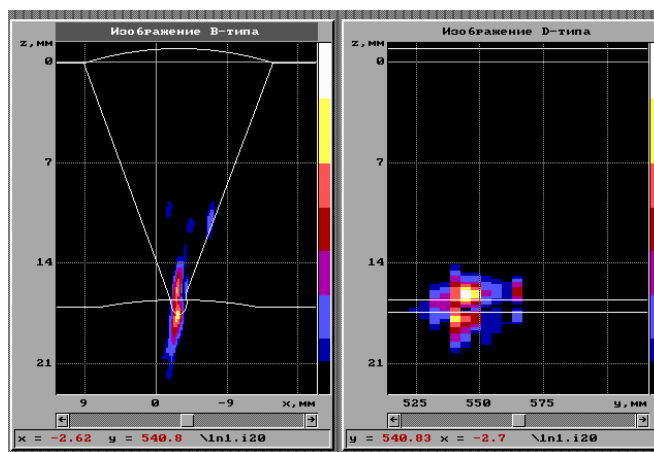
В таблице 3 приведены основные признаки протяженных плоскостных несплошностей в сварных швах по когерентным изображениям, полученным системами серии Авгур. Типичные примеры дефектов из таблицы 5.3 приведены на рис.7 – рис.9. На рис.7 приведены изображения протяженных плоскостных дефектов в сварных швах трубопроводов различного диаметра, полученных с использованием систем серии Авгур: несплавление по кромке (а), межваликовое несплавление (б), непровар (в). Здесь же сплошными линиями показана разделка сварного шва контролируемого трубопровода. Хотелось бы обратить внимание на то, что если изображение непровара на рис.7 в имеет здесь «классический» вид – на нескольких изображениях В- типа непровар представлен двумя «пятнами», то для несплавления по кромке (рис.7а) и межваликового несплавления (рис.7 б) только просмотр всех изображений В- типа и/или просмотр изображений D- типа показывает, что высота этих дефектов больше  $\Delta z$ . На рис.7 б на изображении D- типа видны маркеры, позволяющие измерить размеры дефекта вдоль сварного шва.



а)



б)

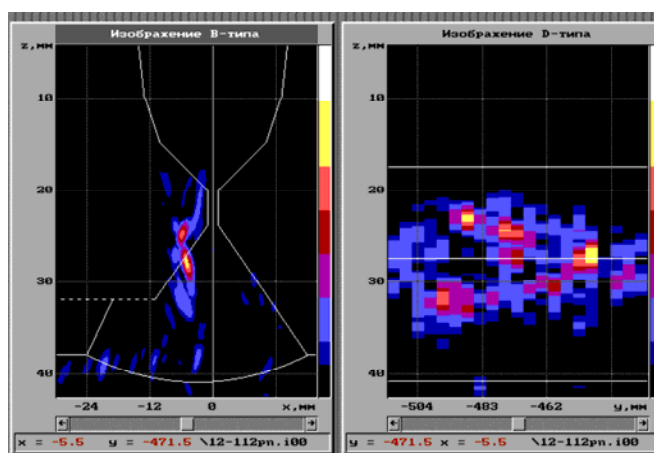


в)

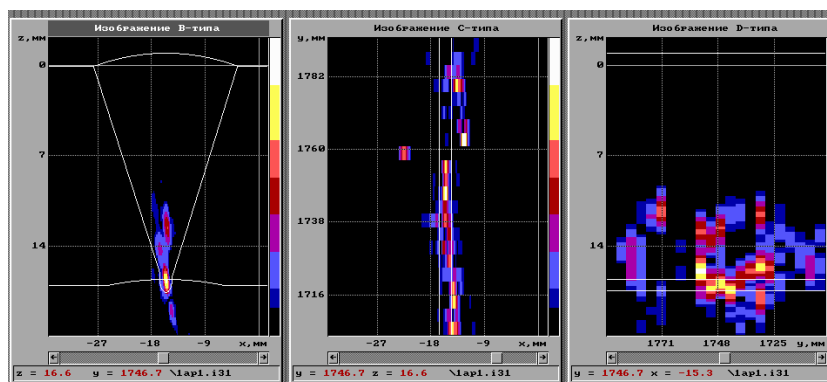
**Рис. 7.** Изображения плоскостных протяженных дефектов в сварных швах трубопроводов:  
 а – изображения В – , С – и D – типа несплавления по кромке;  
 б – изображения В – , С – и D – типа межваликового несплавления;  
 в – изображения В – и D – типа непровара.

На рис.8 приведены некоторые характерные изображения наиболее опасных дефектов – трещин в сварных швах трубопроводов различного диаметра и толщины. На рис.8 а представлено изображение В- и D – типа трещины в трубопроводе толщиной 38 мм в внутренней наплавке. При этом отсутствует отраженный от дна сигнал и изображение дефекта имеет ярко выраженные признаки трещины, что особенно хорошо видно на изображении D – типа. В том случае, когда толщина трубопровода небольшая и по условиям контроля (широкий валик усиления) необходимо использовать отраженные от дна сигналы рассмотрение дефекта требует обязательного включения в рассмотрение отраженного изображения, которое совместно с прямым изображением дают ясные признаки наличия трещины (рис.8 в). Здесь стрелкой показано отраженное изображение. На этом рисунке продемонстрирована компланарность верхнего конца трещины (отраженное изображение) и нижнего конца в корне сварного шва (прямое изображение). На рис.8 б приведено изображение трещины в корне сварного шва. Заметим, на то, что трещина распространяется вдоль сварного шва по извилистой линии, как хорошо видно на изображении С – типа.

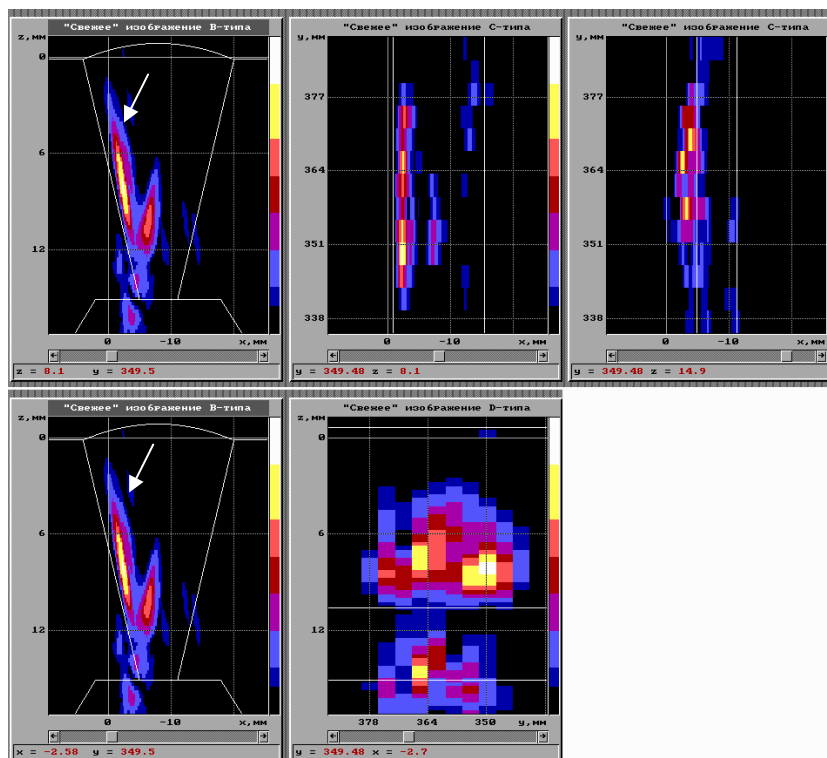
Рис.8



а)



б)



в)

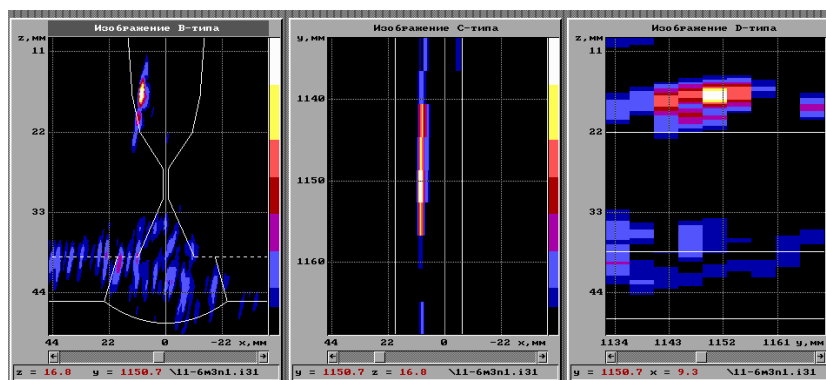
**Рис. 8.** Характерные изображения трещин в сварных швах трубопроводов различных диаметров:

а – изображения В – и D – типа дефекта в сварном шве трубопровода диаметром 990x 38 мм;

б – изображения В – , С – и D – типа трещины в корне сварного шва трубопровода диаметром 325x 15 мм;

в – изображения В – , С – и D – типа трещины сварного шва трубопровода диаметром 325x 15 мм. Изображения С – типа соответствуют сечениям в области вершины дефекта (левое изображение) и в области нижнего края дефекта (правое изображение). Стрелкой показано отраженное изображение.

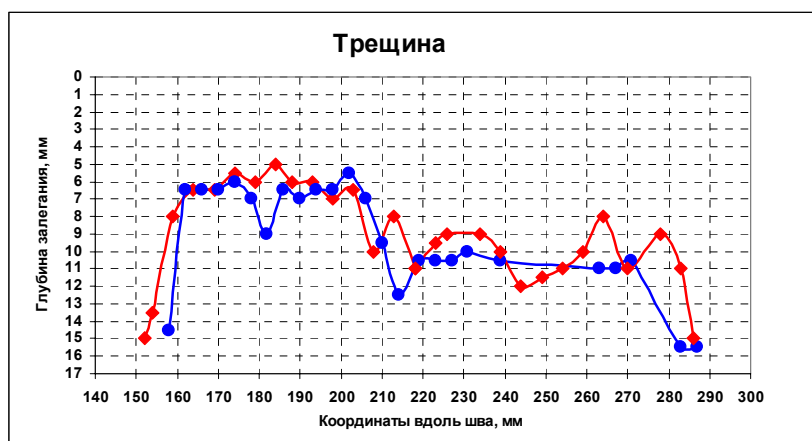
На рис. 9 приведено характерное изображение нитевидной несплошности. Особенностью такой несплошности является то, что ее высота меньше величины разрешения  $\Delta z$ , даваемого системой контроля. Поэтому не представляется возможным определить высоту несплошности. Кроме того, изображения объемной и плоскостной несплошностей не различаются. Поэтому, нитевидная несплошность, как правило, считается плоскостной в соответствии с консервативной оценкой.



**Рис. 9.** Типичное изображение нитевидной несплошности в сварном шве трубопровода.

### Измерение реальных параметров и профиля несплошности.

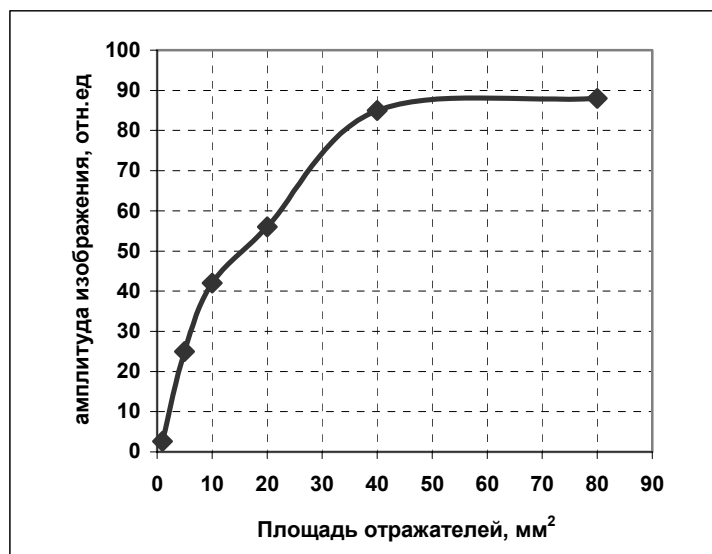
После того, как в изображении выделены все его элементы («пятна»), относящиеся к несплошности достаточно просто определить ее реальные параметры. Длина несплошности (по оси  $Y$ ) определяется по изображениям  $C$  – и  $D$  – типа. В этом случае принимаются во внимание «пятна», с минимальным и максимальным значением координаты  $Y$  амплитуда которых превышает амплитуду шума не менее чем на 6 дБ. Точность определения длины дефекта определяется шагом сканирования по оси  $Y$  и составляет величину  $\sim L/2$  [11]. Высота несплошности определяется из анализа изображений  $B$  – типа. При определении высоты в некотором сечении, которое соответствует измеренному слою, выбирается «пятно» с минимальной координатой  $Z$  максимума его амплитуды, которое определяет максимальную высоту дефекта в выбранной плоскости. Аналогично, максимум амплитуды «пятна» изображения несплошности с максимальным значением  $Z$  определяет нижний конец несплошности. Совокупность таких измерений по всему трехмерному изображению дает профиль дефекта. На рис.10 приведен пример и профиля трещины, определенного по результатам измерений с применением системы Авгур и разрушающих испытаний.



**Рис. 10.** Профиль трещины в сварном шве трубопровода измеренный с применением системы Авгур (синяя линия) и в результате разрушающих испытаний (красная линия).

Необходимо отметить, что амплитуда «пятна» изображения не является информативным параметром. Обычно эти элементы изображения несплошности имеют характерные размеры  $\Delta x$  и  $\Delta z$  и отображают точечные отражатели «блестящие точки», совокупность которых определяет изображение несплошности. В том случае, когда плоскостной дефект расположен в плоскости, перпендикулярной акустическому пучку  $\pm 15^\circ$ , изображение этого дефекта имеет размеры по оси  $X$  существенно большие, чем  $\Delta x$  и размеры этого дефекта определяются по размерам единого изображения дефекта, по уровню отсечки 0,7. При

этом и в этом случае, когда размеры изображения больше элементов разрешения  $\Delta x$ , амплитуда изображения несплошности не может служить информативным параметром. Это связано с тем, что получение изображений с использованием когерентной обработки данных аналогично цифровой фокусировке. Поэтому, амплитуда полученных изображений имеет такую же зависимость от размеров отражателя, как в системах с аналоговой фокусировкой акустического пучка [12-14] (фокусирующие ПЭП, фазированные антенные решетки) – амплитуда изображения рассеивателя растет до тех пор, пока размеры отражателя не превышают величины разрешения. С дальнейшим увеличением размеров отражателя максимальная амплитуда изображения достигает «насыщения», при этом изменяется только форма отражателя. Пример такой зависимости от размеров отражателя для когерентных изображений приведен на рис. 11.



**Рис. 11.** График зависимости максимальной амплитуды изображения от отражающей площади моделей дефектов в виде плоскодонных отверстий с различной площадью отражения от 0,5 мм<sup>2</sup> до 80 мм<sup>2</sup>, полученные с использованием системы серии Авгур.

Здесь представлена зависимость максимумов амплитуды изображений дефектов различной площади (от 0,5 мм<sup>2</sup> до 80 мм<sup>2</sup>). Видно, что амплитуда увеличивается существенно нелинейно – при больших размерах дефекта амплитуда изображения дефекта не увеличивается. В том случае, когда размеры дефекта меньше элемента разрешения – амплитуда падает.

Измерение профиля дефекта при выполнении первичного контроля часто не является необходимым, так как при выполнении прочностных расчетов используются максимальные значения длины и высоты дефектов. Однако, при периодическом наблюдении за выявленным дефектом, знание его профиля является очень важным, так как позволяет наблюдать за развитием дефекта и принимать решение о необходимости его ремонта при дальнейшем его развитии. В частности, на рис. 12 приведены результаты наблюдения за профилем дефекта в течение 4 лет. Видно, что в 2000-2004 годах дефект не развивался, а в 2004 году его профиль значительно изменился – дефект удлинился и, что самое главное, увеличил свою высоту. В результате было принято решение сварное соединение, с этим дефектом отремонтировать.

Рассмотренные выше устойчивые признаки существования дефекта в изображении, правила определения его размеров, позволили разработать алгоритм автоматического определения параметров дефектов [15], которые используются при контроле аустенитных сварных швов трубопроводов диаметром 325x15 мм серии Авгур 4.2.

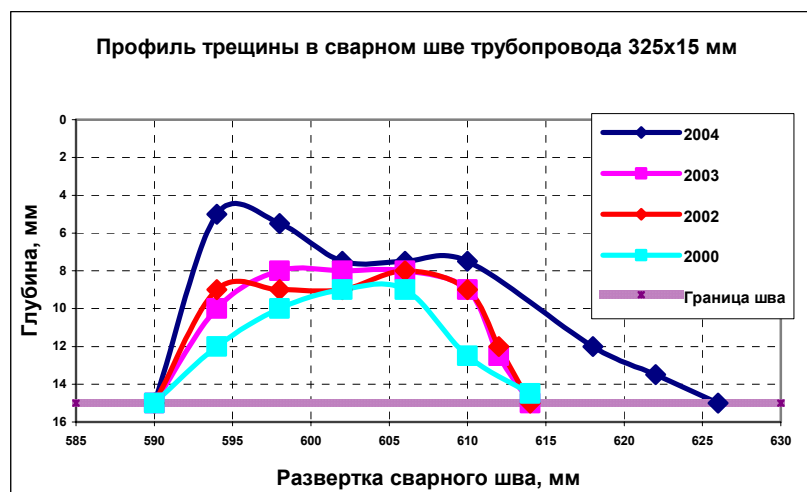


Рис. 12. Наблюдение за трещиной при периодическом контроле в 2000 – 2004 гг.

## 5. Заключение

Проанализированы характерные особенности томографических изображений, формируемых системами с когерентной обработкой данных. Показано, что процесс оценки результатов акустических изображений, для определения типа и измерения размеров несплошностей можно разбить на несколько этапов.

Ключевым этапом является первый, задачей которого состоит в выделении в анализируемом трехмерном томографическом изображении элементов, относящихся к несплошности на фоне значительного количества элементов изображения, относящихся к шумам различной природы, изображению несплошности, связанному с преобразованными на несплошности акустическими волнами других типов и другими артефактами. Кроме того, задача усложняется возможными пропусками изображения, за счет нарушения акустического контакта. Приведенные в работе общие критерии отбора этих элементов, позволяют в значительной степени решить эту задачу и перейти к следующей – определить тип выявленной несплошности. Для уверенного ее решения необходимо выполнять анализ трехмерного изображения несплошности. Приведенные общие правила определения типа несплошности позволяют определить ее тип: протяженная или непротяженная, объемная или плоская. Для более детального различения несплошностей по их типам в работе приведены таблицы основных особенностей когерентных изображений для различных типов несплошностей в сварных швах и примеры характерных изображений для них. При этом амплитуда анализируемого изображения не является существенным признаком, характеризующим несплошность. Это связано с тем, что абсолютное значение амплитуды когерентного изображения несплошности зависит от множества причин, таких как ее размер, ориентация, локализация в изделии, акустические параметры материала. Кроме того, в значительной степени (на 70% [16]) когерентное изображение зависит от фазовой составляющей зарегистрированного акустического поля после его взаимодействия с несплошностью. Заключительным этапом анализа изображений является определение реальных параметров дефектов. Приведенные в работе правила определения параметров дефектов позволяют измерять их с точностью определяемой разрешением  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  систем визуализации. И в этом случае амплитуда акустических изображений не определяет размеры рассматриваемого дефекта. Относительная независимость отдельных «слоев» в томографическом изображении позволяет получить профиль дефекта. Знание профиля дефекта является очень полезным при выполнении периодического контроля объекта, так как позволяет наблюдать за развитием дефекта.

Приведенные в работе критерии анализа изображений были использованы для разработки автоматизированных алгоритмов обработки данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Сыркин М.М.** Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля. – Дефектоскопия, 2003, №3, с. 11 – 23.
2. **Жмуркин Ю.А., Яблоник Л.М.** Автоматизация и механизация ультразвукового контроля сварных швов в судостроительной промышленности. // Дефектоскопия. – 1981. - № 3. – С. 49 – 61.
3. **Moles M., Ginzel E., Dubè N.** Phased Arrays for Pipeline Girth Weld Inspections In-sight, 2002, 44, N 2,p
4. **Selby G.** Phased Array UT Applications Development at the EPRI NDE Center // NDT.net - October 1999, v. 4, N 10.
5. **Langenberg K.J., Berger M., Kreutter Th., Mayer K., Schmitz V.** Synthetic aperture focusing technique signal processing. // NDT Int., 1986, v. 19, N 3, p. 177-189.
6. **Ogilvi I.A.** Ultrasonic beam profiles and beam propagation in austenitic weld a theoretical ray tracing model. - Ultrasonics, 1986, N 11, p. 337 – 347.
7. **Алешин Н.П., Вадковский Н.Н., Волкова Н.Н.** Ультразвуковой контроль аустенитных сварных швов: анализ способов и рекомендации по повышению надежности. – Дефектоскопия, 1988, №2, с. 43 – 59.
8. **Алешин Н.П., Горная С.П.** Новый подход к оптимизации УЗК аустенитный сварных соединений. – В мире НК, 2003, №1(19), 16 – 18.
9. **Ультразвуковой экспертный контроль сварных швов трубопроводов и оборудования АЭС с применением компьютерных голографических систем серии Авгур (общие методические положения) – МЭ-ОМП-98, М., 1998.**
10. **Бадалян В.Г., Гребенников В.В., Гребенников Д.В., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С.** Методика экспертного ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК с применением компьютерных систем серии АВГУР. МЭ-ТАМ/2-К-02. М., НПЦ «ЭХО+», 2002
11. **Бадалян В.Г.** Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных // Дефектоскопия. – 2003. - № 3. – С. 12 – 23.
12. **De Vadder D.** Détection des grands défauts plans mal orientés à l'aide de transducteurs focalisés // 8 Cannes Conf. Mondiale sur les essais non destructifs, 1976, Sect. 3K1, 3H1, 3G, p. 3HS/1 - 3HS/10.
13. **Saglio R., Prot A.C., Touffait A.M.** Determination of defect characteristics using focused probes // Mater. Eval. – 1978. – V. 36. – N 1. – P. 62 – 66.
14. **Wüstenberg H., Erhard.** Matching of ultrasonic flaw sizing methods to the defect type and location. // Nuclear Engin. & Design. – 1984. – V. 81. – P. 315 – 323.
15. **Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Доленко С.А., Орлов Ю.В., Персианцев И.Г.** Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы ультразвуковых систем с когерентной обработкой данных. // Дефектоскопия, 2004, № 12, 3 – 15.
16. **Gallagher N.C.** Optimum quantization and relative information content of holographic magnitude and phase // Acoustical imaging and holography. 1979, v.1, № 2, p. 119 – 132.