

# Алгоритмы обработки данных для автоматизации работы УЗ систем с когерентной обработкой данных.

*Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Доленко С.А.,  
Орлов Ю.В., Персианцев И.Г.*

Рассмотрены два алгоритма автоматического определения параметров дефектов при УЗК сварных швов с высоким уровнем структурных помех. В работе использован опыт эксплуатации и оценки данных неразрушающего контроля, полученных с применением систем автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) с когерентной обработкой данных серии Авгур (системами Авгур 4.2 и Авгур 5). Первый алгоритм обработки данных используется для выявления зон, в которых могут быть дефекты. Этот алгоритм применяется после выполнения «поискового» режима работы системы АУЗК. При должном выборе параметров, использование этого алгоритма позволяет определять координаты, условную длину обнаруженного дефекта. Второй алгоритм обработки предназначен для определения реальной длины и высоты дефекта. При его работе используются изображения, полученные в результате когерентной обработки данных. Приведены результаты испытаний методов автоматического (программного) определения параметров дефектов на данных, полученных системой Авгур при контроле аустенитных сварных швов трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325 мм, а также трубопроводов из перлитной стали различных диаметров.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля (УЗК) нашли широкое применение в промышленности. Одним из важнейших направлений развития УЗК являются автоматизированные системы УЗК. Использование таких систем дает хорошие результаты с точки зрения объективности обнаружения дефектов, определения их координат, условной протяженности и эквивалентных размеров [1,2]. Однако, этих данных недостаточно специалистам по прочности для надежного расчета рабочего ресурса контролируемого объекта. Поэтому в последнее время широкое распространение получили системы, использующие когерентную обработку данных [3, 4]. Характерной их особенностью является возможность дополнительного определения реальной длины, высоты и, если это необходимо, профиля дефекта, осуществления мониторинга контролируемых объектов [5]. Эта информация с учетом других характеристик, влияющих на прочность, используется при уточненном прочностном расчете ресурса работы сварного шва. Если по расчетам запас прочности таков, что имеется возможность дальнейшей эксплуатации – сварной шов допускается в работу оборудования. В противном случае – отправляется в ремонт.

Однако автоматизация оценки результатов контроля с определением реальных параметров дефектов встречает ряд трудностей.

Достаточно успешно решается проблема автоматизации сбора, регистрации и обработки данных. Вместе с тем оценка результатов контроля, 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. Эта проблема плохо поддается автоматизации из-за того, что приходится решать обратную задачу – по измерениям акустического поля, отраженного или рассеянного несплошностью, необходимо восстановить тип и параметры несплошности. Как известно, обратные задачи – это часто некорректные задачи, которые могут не иметь единственного решения. Поэтому полная замена специалиста – эксперта, оценивающего результаты на основе некоторых правил и опыта, представляется очень сложной. Ряд признаков, характеризующих дефект, можно сформулировать, формализовать и использовать при построении логического

алгоритма определения параметров дефектов. Однако принятие окончательного решения все-таки остается за экспертом.

Необходимо отметить, что ряд признаков, характеризующих дефекты, весьма неопределенны, и их «встраивание» в логический алгоритм распознавания не представляется возможным. Вероятно, их использование для автоматизации решения задачи классификации требует применения нейросетевых алгоритмов [6].

Ниже будут рассмотрены алгоритмы, использующие только основные, устойчивые признаки, характеризующие несплошность – ее наличие, реальные параметры, профиль несплошности, тип несплошности: протяженные, непротяженные, нитевидные, протяженные объемные или плоские.

Для уменьшения времени контроля и оптимизации данных, в которых содержится информация о несплошностях, методология работы с автоматизированной системой с когерентной обработкой данных состоит из реализации двух этапов контроля: **поискового** и **измерительного**. Каждый из этих этапов заканчивается оценкой полученных данных, выполняемой персоналом, использующим этот прибор.

Задачей **поискового** режима является обнаружение дефектных зон для проведения измерительного режима, определение их длины и координат. Задачей **измерительного** режима является определение типа и параметров выявленных несплошностей.

В решении каждой из этих задач участвует специалист. Определение границ дефектных зон для проведения измерительного режима – более простая задача, она не предъявляет высоких требований к специалисту (оператору), выполняющему контроль, тогда как задача определения типа и параметров выявленных несплошностей сложнее и требует значительно более высокой квалификации специалиста (эксперта).

Первая задача формализуется достаточно просто. Оператор на ее решение затрачивает немного времени (порядка нескольких минут). Однако и это время составляет почти 30% общего времени, затрачиваемого на регистрацию данных.

Вторая задача значительно труднее поддается формализации и в полном объеме до настоящего времени еще не решена. Вместе с тем, эксперт затрачивает на нее много времени (десятки и сотни минут), особенно при работе с некачественными данными (нарушения контакта, неровности поверхности и т. д.). Поэтому любая форма автоматизации работы эксперта здесь весьма полезна.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТНЫХ ЗОН.

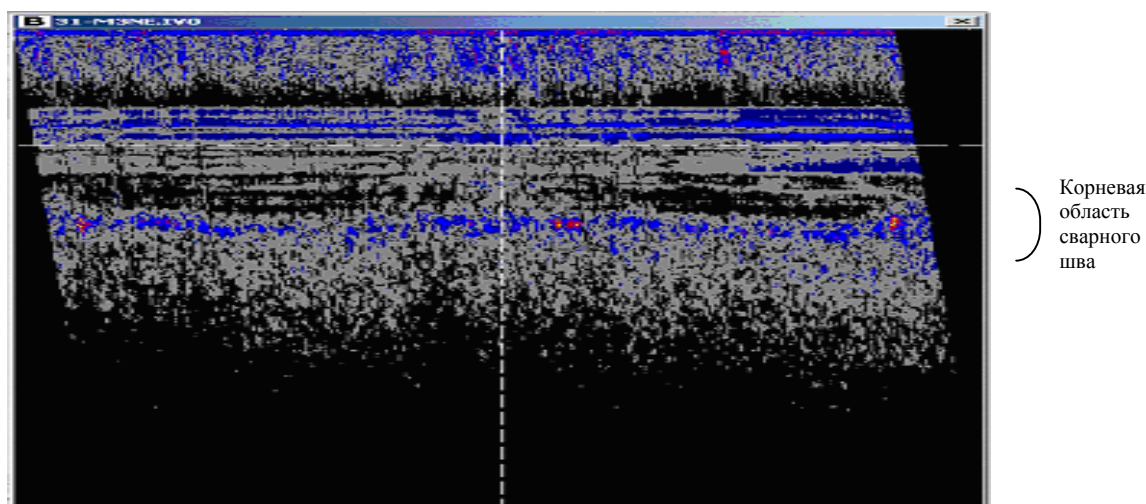
В работе [7] приведены результаты работы амплитудного алгоритма автоматического выделения дефектных зон по изображению А-сканов при регистрации данных методом TOFD. Аналогично работает алгоритм выделения дефектных зон по некогерентному изображению дефектов при поисковом режиме контроля в системе Авгур. Однако такой алгоритм становится малоэффективным при ультразвуковом контроле материалов с высоким уровнем структурных шумов – нержавеющей стали, аустенитных сварных швов и др.

Алгоритм, описываемый ниже, успешно работает как при УЗК материалов с повышенным уровнем структурных шумов, так и обычных малозагрязненных материалов.

Этот алгоритм применяется к файлам некогерентных изображений контролируемого объема изделия, полученных при поисковом режиме работы системы Авгур. Зарегистрированный файл данных содержит набор изображений В-типа, соответствующих сканированию ПЭП по линии вдоль сварного шва на различном удалении от него.

На рис. 1 представлено проекционное изображение В-типа, в котором все изображения В-типа, полученные на разных расстояниях от сварного шва, представлены на одной XZ – плоскости. Здесь X (горизонтальная ось) соответствует направлению вдоль сварного шва, Z (вертикальная ось) определяет расстояние между несплошностью и электроакустическим преобразователем. Ось Y соответствует

направлению, перпендикулярному линии сварного шва, и характеризует расстояние между электроакустическим преобразователем и сварным швом.



**Рис. 1.** Изображение данных на мониторе при поисковом режиме работы системы Авгур 4.2.

Характерной особенностью такого изображения является то, что наличие несплошности в нем проявляется присутствием «пятна» изображения на нескольких расстояниях  $Z$  при постоянной координате  $X$  и повышенным значением амплитуды изображения. Однако, в большинстве случаев, подобным образом, но не так регулярно, ведет себя и область повышенного уровня шума, связанная с влиянием сварного шва. Оператор достаточно легко выделяет подозрительные зоны. Однако, для этого ему нужно время на просмотр, оценку полученных данных, выбор координат «подозрительной» зоны и занесение своего решения для выполнения измерительного контроля. При этом возможен пропуск несплошности малой длины (любой высоты).

Алгоритм автоматического выделения таких «подозрительных» зон практически повторяет логику действия оператора:

1. Для каждого изображения  $B$  – типа удаляется низкоамплитудный шум, за счет пороговой отсечки  $T$  на уровне

$$T=A+2\sigma.$$

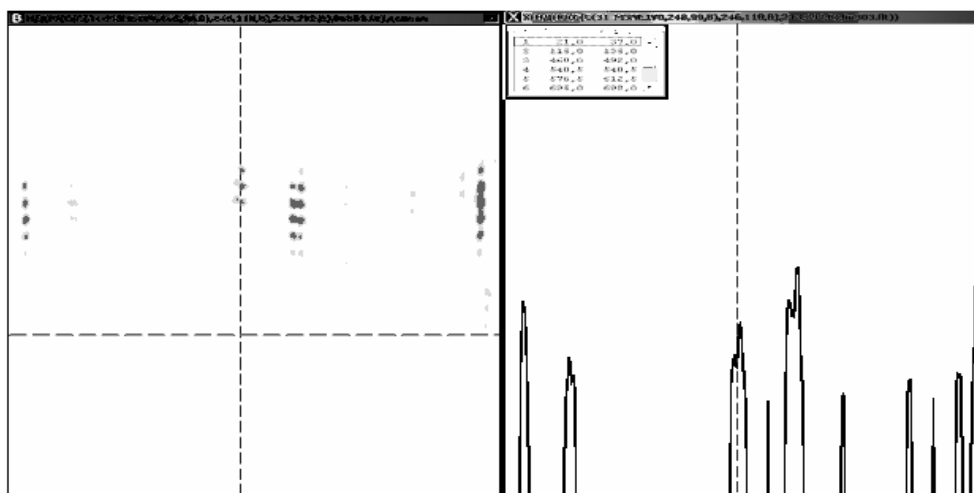
Здесь  $A$  – средняя интенсивность изображения,  $\sigma$  – его дисперсия.

2. Выполняется сглаживание изображений, с целью уменьшения влияния внешних условий: изменения акустического контакта, нестабильности работы аппаратуры и т.д.

Для этого выполняется последовательное перемещение фильтра по изображению на одну точку, взвешенное суммирование интенсивностей исходного изображения с весовыми коэффициентами фильтра и нормирование полученной суммы на сумму весовых коэффициентов. В качестве фильтра используется изображение  $3 \times 3$  пиксела с единичной интенсивностью.

3. Полученное изображение проецируется на плоскость  $XY$ , т.е. в каждой точке каждой такой плоскости устанавливается средняя амплитуда вдоль оси  $Z$ , умноженная на число слоев  $A$  – сканов. В результате имеется возможность проследить за поведением «подозрительных» изображений с изменением расстояния ПЭП от линии сварного шва.
4. В заключение выполняется построение двумерного сечения изображения вдоль оси  $X$ , т.е. зависимости амплитуды изображения от  $X$  при фиксированных значениях  $Y$  и  $Z$ .

Анализ этого сечения заключается в поиске участков с ненулевыми значениями и объединении участков, отстоящих друг от друга на расстояние менее 3 шагов по координате X. Полученные участки считаются "подозрительными зонами" (рис. 2).



**Рис. 2.** Результаты работы алгоритма.

На рис. 2 слева приведено обобщенное отфильтрованное проективное изображение В-типа (в координатах YZ) после выполнения этапов 1-3 алгоритма. Хорошо видны системы «пятен», соответствующие одной координате Y, которые указывают на место локализации несплошности. На рис.2 справа приведено графическое представление сечения обобщенного отфильтрованного изображения, являющегося результатом выполнения 4 этапа алгоритма. В верхней части окна отображаются числовые значения начала и конца «подозрительных» зон.

Результаты применения описанного алгоритма фиксируется в Excel таблице (Рис. 3), в которой определены координаты начала и конца «подозрительной» зоны, максимальная амплитуда изображения внутри зоны. Одновременно эти же зоны «размечаются» на соответствующем файле.

Далее по этим зонам выполняется контроль в измерительном режиме.

	A	B	C	D	E	F
1	Диапазон	Начало	Конец	Длина	Ампл	
2	1	19	37	18	44	
7	6	576,5	612,5	36	51	
12	11	965,5	1015,5	50	90	
13						
14						
15						

**Рис. 3.** Результаты работы алгоритма поиска «дефектных» зон.

Работоспособность алгоритма испытывалась на сварных швах трубопроводов из перлитной стали диаметрами 1020 мм, 828 мм, а также трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325 мм.

Проведенные сравнения работы программного определения «подозрительных» зон и определения границ зон экспертом показали, что:

1. Алгоритм получения данных при применении программы одинаково хорошо работает на трубопроводах различного диаметра.
2. Зоны, выделенные программой, содержат **все несплошности**, отмеченные экспертами.
3. Анализ данных экспертизы и результатов работы программы показывает, что во многих случаях зоны, выделенные экспертом, не выделяются программой. Однако во всех этих зонах после выполнения измерительного контроля, дополнительная экспертиза подтвердила отсутствие дефектов.
4. Общая длина программных зон, предназначенных для измерительного контроля, почти на 30% меньше, чем зон, выбранных экспертом. Это позволяет существенно уменьшить время на измерительный контроль.

Программа поиска дефектных зон используется при автоматическом определении областей измерительного контроля в системе Авгур 5.2.

Отметим, что при установлении пороговых значений амплитуды сигналов от дефектов появляется возможность автоматического определения условных параметров дефектов по абсолютному критерию даже при высоком уровне структурных шумов.

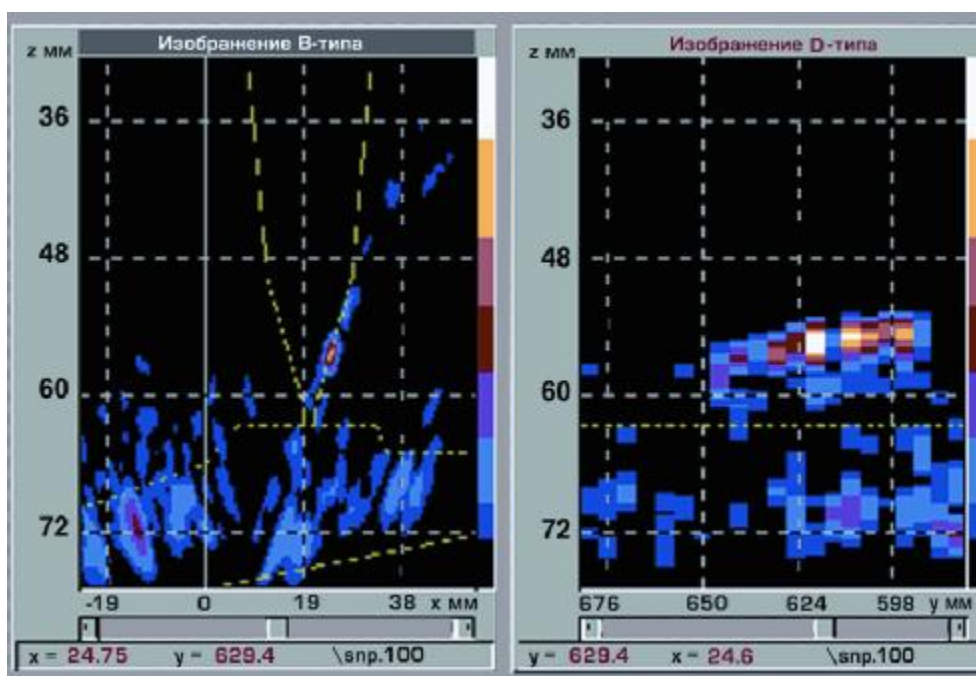
### **3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ**

Как уже отмечалось ранее, результатом автоматического определения дефектных зон с использованием амплитудных алгоритмов является выявление дефектов и определение их условной длины. Однако, при измерении реальной длины и высоты дефектов необходимо дополнительное исследование, которое выполняется экспертом. Ниже будет описан алгоритм, задачей которого является определение реальных параметров дефекта – его длины и высоты. Подчеркнем, что результаты его работы необходимо дополнительно проанализировать эксперту. Вместе с тем, объем рутинной работы эксперта по оценке результатов контроля резко уменьшается за счет выделения собственно дефекта, исключения таких видов анализа, как определение координат каждой части изображения, принадлежащего дефекту, и автоматического занесения этих данных в протокол.

Особенностью этого алгоритма является то, что он успешно работает при повышенном уровне структурных шумов материала, например, при контроле аустенитных сварных швов в трубопроводах из нержавеющей стали диаметром 325 мм.

Алгоритм определения параметров несплошностей использует файлы изображений контролируемого объема изделия, полученных после когерентной обработки данных, полученных при измерительном режиме работы системы Авгур.

Типичное изображение контролируемого объема сварного шва с наплавкой, полученное после когерентной обработки данных, приведено на рис. 4.



**Рис. 4.** Изображение протяженного дефекта. Изображение В-типа (слева), изображение D -типа (справа). Сплошные линии – разделка сварного шва.

На рисунке приведены изображения В–типа (в координатах  $X$ ,  $Y_k = 629,4$  мм,  $Z$ ) и D–типа (в координатах  $X_m = 24,6$  мм,  $Y$ ,  $Z$ ) протяженного дефекта, расположенного на границе сварной шов – основной металл. Здесь же приведена схема разделки сварного шва по конструкторской документации. Оси  $X$  и  $Y$  направлены перпендикулярно и вдоль сварного шва соответственно, координата  $Z$  определяет глубину залегания неоднородности относительно внешней поверхности трубопровода. Область наплавки характеризуется повышенным уровнем структурного шума.

На рис. 4 также видны проблемы, которые необходимо учитывать при автоматизации определения параметров дефектов: присутствие структурных шумов, нестабильность качества акустического контакта при сканировании вдоль сварного шва, связанного со значительной волнистостью поверхности в околосшовной зоне.

Алгоритм автоматизации определения реальных параметров дефектов разбивается на ряд этапов:

1. Предварительная обработка изображений.
2. Выделение совокупности элементов изображений, относящихся к несплошностям, на фоне помех.
3. Определение типа несплошности.
4. Оконтуривание несплошности и определение ее параметров.

1 этап. Предварительная обработка изображений.

Эта обработка состоит в отсечке низкоамплитудного и высокоамплитудного шумов изображения, поиске локальных максимумов по всему изображению В - типа и построении контура равной интенсивности вокруг каждого локального максимума. Задачей ее является необходимость описания анализируемого изображения небольшим набором признаков.

**Отсечка низкоамплитудного шума** выполняется так же, как это делается в алгоритме определения дефектных зон.

**Отсечка высокоамплитудного шума**, связанного с наводками, импульсными помехами и другими артефактами, выполняется фильтрацией изображения с применением фильтра  $S$ , представляющего собой двумерную матрицу весов

$$S_k \equiv S_{xz},$$

определяющую изображение точечного источника, полученного соответствующим ПЭП, с отсечкой по уровню 0,5. Так как размер фильтра значительно меньше размера изображения, к которому данный фильтр применяется, то при такой фильтрации все детали изображения с характерным размером меньшим, чем размер элемента разрешения, будут сглажены, а более крупные детали останутся.

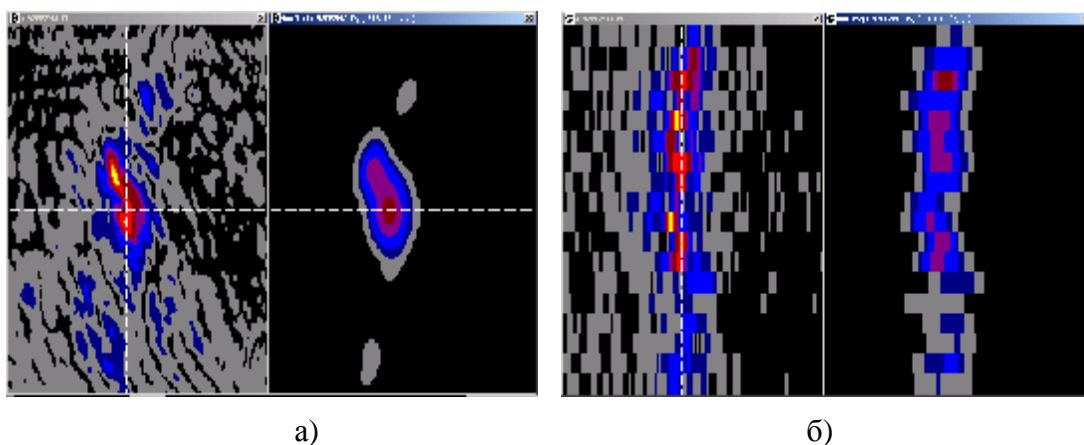
При этом новое значение матрицы интенсивностей в точке  $j$  определяется выражением:

$$\tilde{A}_j = \frac{\sum_{k \in S} S_k A_k}{\sum_{k \in S} S_k},$$

где точка  $j$  соответствует геометрическому центру фильтра  $S$ . Результат этой операции присваивается центральной точке фильтра.

Таким образом, фильтрация заключается в последовательном перемещении фильтра по изображению на одну точку, взвешенном суммировании интенсивностей исходного изображения с весовыми коэффициентами фильтра и нормировании полученной суммы на сумму весовых коэффициентов.

На рис. 5 представлен результат фильтрации изображения дефекта в сварном шве трубопровода из нержавеющей стали. Акустическая ситуация в таких изделиях характеризуется высоким уровнем структурных шумов как в самой области сварного шва, так и в околошовной зоне, где локализован рассматриваемый дефект.



**Рис. 5.** Изображение дефекта в сварном шве до обработки (слева) и после отсечки низкоамплитудного и высокоамплитудного шума (справа); а) изображение В-типа, б) изображение С – типа.

На рис. 5 хорошо видно, что полученное после такой обработки изображение в значительной степени «очищено» от шумов различной природы, что дает возможность иметь дело с относительно незначительным числом локальных максимумов, которые могут соответствовать локализации отражающей области, и соответствующих им двумерных контуров.

Затем для каждой плоскости, формирующей фильтрованное изображение В-типа (плоскость  $XZ$ ), выполняется **поиск локальных максимумов**.

Для этого рассматривается двумерная матрица весов фильтра  $S$  как маска, определяющая, какие точки, попадающие в апертуру фильтра, участвуют в расчетах. Если расположить геометрический центр фильтра-маски в точке  $j$ , соседями данной точки  $j$  будут считаться те точки изображения, которым соответствуют ненулевые значения в матрице  $S$ . Когда интенсивность изображения в данной точке  $j$  больше или равна интенсивности изображения во всех её точках-соседях, считается, что такая точка является локальным максимумом поля интенсивностей изображения. При этом интенсивность изображения в такой точке оставляется неизменной. Если же среди точек-соседей найдется хотя бы одна, в которой интенсивность больше, чем в точке  $j$ , то точка  $j$  не является максимумом в описанном выше смысле, и интенсивность в этой точке приравнивается нулю.

Для каждого максимума в данной плоскости ищутся **двумерные контура** с интенсивностью, равной интенсивности изображения в точке с координатами локального максимума, умноженной на заданный относительный уровень, например, уровень 0,7 от максимума.

2 этап. Выделение совокупности элементов изображений, относящихся к несплошностям, на фоне помех.

Дальнейшая обработка представляет собой реализацию набора логических правил, определяющих совокупность элементов изображений, относящихся к несплошности.

При этом считается, что если двумерные контура удовлетворяют нижеизложенным правилам, то они могут относиться к несплошностям:

а) Размер каждого контура должен быть не менее 50% размера элемента разрешения (по  $X$  и по  $Z$ ).

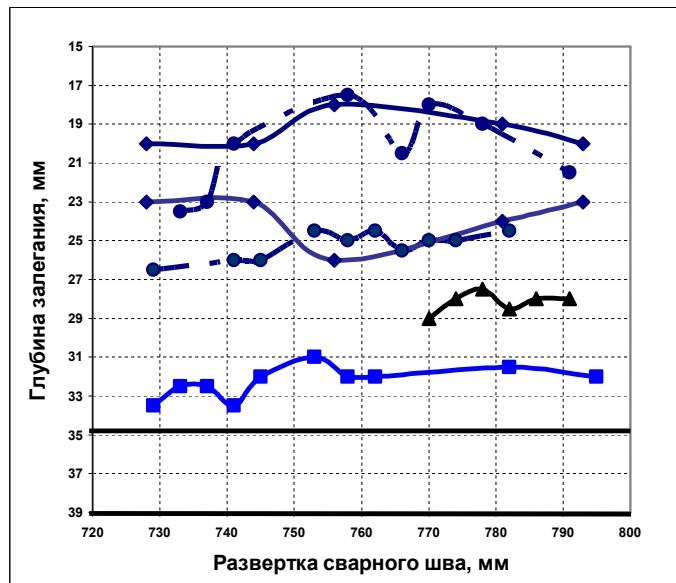
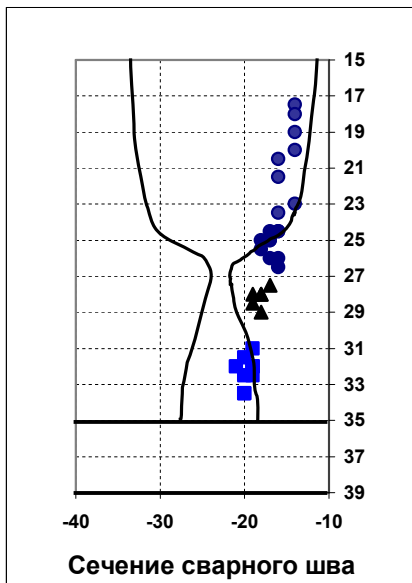
Заметим, что это правило выполняется почти всегда, но когда контура не удовлетворяют этому условию, они считаются «подозрительными» и в дальнейшем должны оцениваться экспертом.

а) Контура, лежащие в соседних плоскостях (вдоль оси  $Y$ ), координаты максимумов для которых отличаются меньше, чем на половину элемента разрешения по  $X$  и по  $Z$ , объединяются. При этом допускается возможность пропуска контуров в соседних 1-2 слоях (в каждую сторону), что связано с учетом возможного нарушения акустического контакта при регистрации данных.

В результате формируются трехмерные контура, элементы, которых принадлежат одной и той же несплошности. По существу, определение трехмерных контуров решает задачу выделения элементов несплошности из объема области сварного шва, подвергнутого УЗК.

На рис. 6 приведен пример работы алгоритма выделения элементов несплошности для дефекта сварного шва трубопровода диаметром 830 мм с наплавкой.

На рис. 6 видны хорошо сформированные трехмерные контура, которые отображаются в виде «скелетной» линии, проходящей через локальные максимумы трехмерного изображения контролируемого объема. Контура, относящиеся к несплошности, определенные при экспертизе (1), удовлетворительно согласуются с данными полученными программно (2). Контур 3 соответствует неоднородности на границе сварной шов – основной металл; контур 4 соответствует границе сварной шов – аустенитная наплавка по ультразвуковым данным.



а)

б)

**Рис 6.** Элементы несплошностей, выявленные после выполнения 2 этапа алгоритма:

а - соответствует проекции максимумов всех контуров выделенной несплошности на плоскость XZ – плоскость поперечного сечения сварного шва; б - соответствует проекции максимумов всех контуров выделенных несплошностей на плоскость YZ – плоскость сечения вдоль сварного шва. Здесь же приведена идеализированная разделка сварного шва (сплошные линии).

- ¾ линии 1 – соответствуют контурам дефекта, полученным по оценке эксперта;
- ¾ линии 2 – соответствуют контурам дефекта, полученным программно;
- ¾ линия 3 – соответствует контуру границы сварной шов – основной металл, полученному программно;
- ¾ линия 4 – соответствует контуру границы сварной шов – наплавка, полученному программно.

### 3 этап. Определение типа несплошности

Для определения типа несплошности в дальнейшем рассматриваются все возможные пары трехмерных контуров. В алгоритме различаются несплошности: непротяженные, протяженные, объемные, плоские и нитевидные.

Несплошность считается **непротяженной**, когда длина трехмерного контура не превышает 3 соседних плоскостей (вдоль оси Y).

Возможно наличие цепочки отдельных непротяженных несплошностей. В этом случае отдельные несплошности должны находиться на расстоянии большем, чем 3 соседние плоскости.

Несплошность считается **протяженной**, когда длина трехмерного контура превышает 3 соседние плоскости .

Несплошность считается **плоскостной**, если найдётся пара трехмерных контуров, удовлетворяющих следующим требованиям:

- Количество В–срезов, в которых наблюдаются контура, принадлежащие обоим рассматриваемым трёхмерным контурам, не менее 4.
- На каждом XZ–срезе угол между прямой, соединяющей максимумы соответствующих контуров, и осью Z составляет не более 45 градусов.
- Рассматриваемые два трехмерных контура коллинеарны с точностью до  $\pm 15$  град.

Несплошность считается **нитевидной** когда несплошности являются протяженными, но состоят из одиночных трехмерных контуров, или их цепочки. Соответствующая несплошность будет иметь высоту обычно менее 3 мм.

Характерной особенностью **объемной** несплошности является высокая амплитуда изображения дефекта. Это, в первую очередь, связано с тем, что для таких дефектов индикатриса рассеяния отлична от нуля в широком диапазоне углов.

#### 4 Этап. *Оконтуривание несплошности и определение ее параметров.*

Когда определены трехмерные контура, достаточно просто выделить контуры дефекта и его параметры. Однако здесь имеется проблема, связанная с тем, что среди всех контуров, выделенных программой, не все могут относиться к несплошности.

Во-первых, наличие геометрических отражателей, связанных с конструктивными особенностями контролируемого объема, дает высокоамплитудные отраженные сигналы и приводит к появлению трехмерных контуров после выполнения 2 этапа обработки изображений. Автоматическая фильтрация таких контуров возможна, когда имеется точная информация о геометрии контролируемого сварного шва. Однако реальный профиль сварного шва очень неточно соответствует конструкторской документации и для фильтрации таких контуров необходимо воспользоваться знаниями и опытом эксперта, либо адаптивными самообучаемыми алгоритмами, например, реализующими нечеткую логику или нейросетевыми.

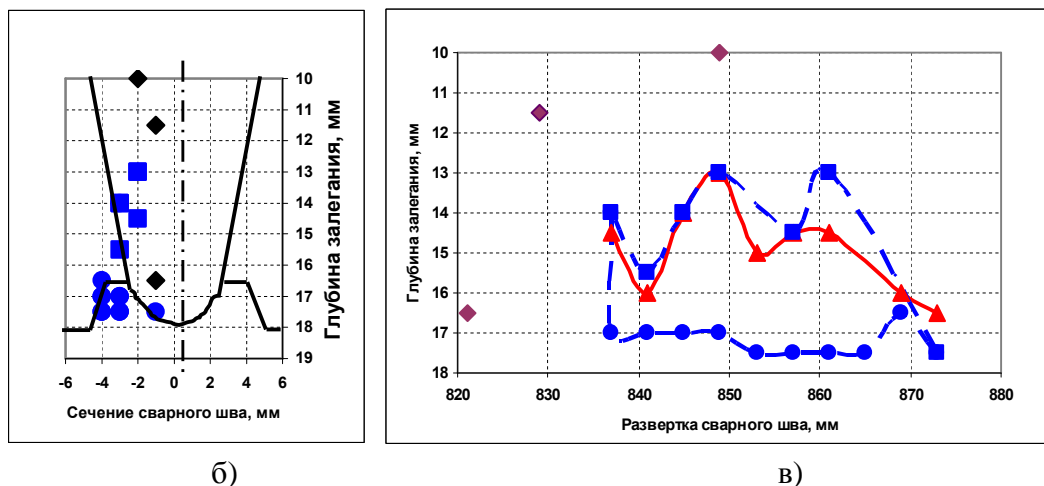
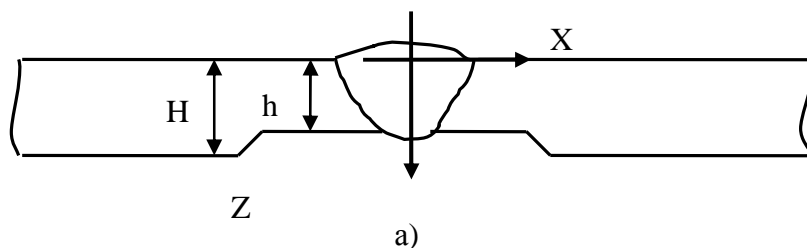
Во-вторых, на границе раздела двух сред с различным волновым сопротивлением всегда имеется отраженный сигнал, который часто наблюдается на изображении контролируемого сечения и выделяется программой в виде трехмерного контура. Например, такая ситуация представлена на рис.6 (контура 3 и 4). Обычно амплитуда изображений, соответствующая этим контурам, значительно меньше амплитуды контуров, соответствующих несплошности. Однако это правило очень часто нарушается. Поэтому очень полезным для определения параметров дефекта и выделения его контура в контролируемом объеме является наличие априорной информации о преимущественном характере дефектов (подповерхностные или поверхностные и т.д.). Это позволяет сформулировать ряд логических правил, позволяющих выполнить оконтуривание дефекта и определение его параметров.

Нами эти правила были сформулированы для коррозионных дефектов в аустенитных сварных швах трубопроводов из нержавеющей стали диаметром 325 мм. В этих изделиях в подавляющем большинстве встречающиеся плоскостные поверхностные дефекты, которые растут от внутренней поверхности трубопровода и ориентированы вдоль границы наплавленный металл – основной металл.

В том случае, когда после выполнения 3 этапа алгоритма определено, что несплошность является плоскостной, для получения ее контура принимается, что:

- Если все точки трехмерного контура имеют координату  $Z$ , удовлетворяющую неравенству  $h - 1 \text{ мм} \leq Z \leq H$ , то контур считается относящимся к "низу" несплошности;
- Если все точки данного трёхмерного контура имеют координату  $Z$ , удовлетворяющую неравенству  $Z < h - 1 \text{ мм}$ , контур считается относящимся к "верху" несплошности;
- В том случае, когда часть точек данного контура удовлетворяют одному неравенству, а часть – другому, считается, что контур может относиться как к "низу", так и к "верху" несплошности ("смешанный" тип) и окончательная принадлежность точек этого контура должна устанавливаться экспертом.

На рис. 7 а приведена схема сварного шва, параметры которого  $h$  и  $H$  используются в рассматриваемом логическом алгоритме.



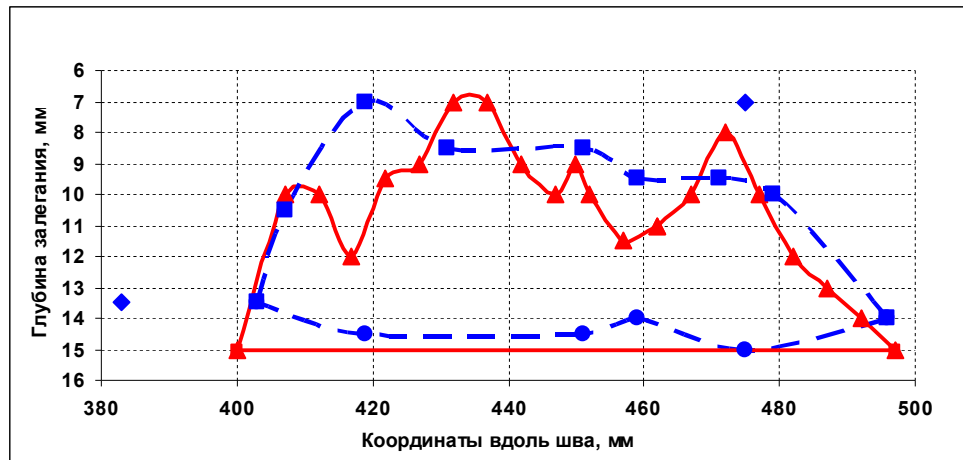
**Рис. 7.** Результаты автоматизированного определения профиля плоскостной несплошности в сварном шве трубопровода.

- ▲ – «подозрительные точки»;
- ◆ – точки, полученные экспертом;
- – точки верхнего края дефекта, полученные программно;
- – точки нижнего края дефекта, полученные программно

На рис. 7 б приведено проективное изображение поперечного сечения сварного шва. Здесь на сечение сварного шва спроецированы все точки, выделенные программой в области сварного шва длиной 60 мм (координаты  $Y$  развертки шва 820 мм – 880 мм). Точки, круглой и квадратной формы, относятся к плоскостному дефекту, выделенному алгоритмом определения параметров дефекта: кружки относятся к его нижнему краю, квадраты – к верхнему краю. Ромбами отмечены «подозрительные» точки, которые удовлетворяют лишь части логических правил. Принадлежность этих точек к несплошности оценивает эксперт. В данном случае ни одна из них не принадлежит рассматриваемой несплошности. Число таких «подозрительных» точек обычно невелико, однако их необходимо оценить эксперту, потому что среди них могут встречаться точки, принадлежащие дефекту.

На рис. 7 в приведена проекция продольного сечения сварного шва. Фактически, это профиль дефекта. Здесь точки, определенные программно, соединены пунктирной кривой, треугольные, соединенные сплошной линией, - точки верхней границы несплошности по оценке эксперта. Отметим, что погрешность определения параметров дефекта экспертом в этом объекте составляет  $\pm 1,5$  мм в 95% доверительном интервале [8]. Поэтому можно считать, что данные, полученные программно и оцененные экспертом, неплохо совпадают. При этом необходимо иметь в виду, что корректным является сопоставление данных при одинаковых координатах  $Y$  – вдоль сварного шва.

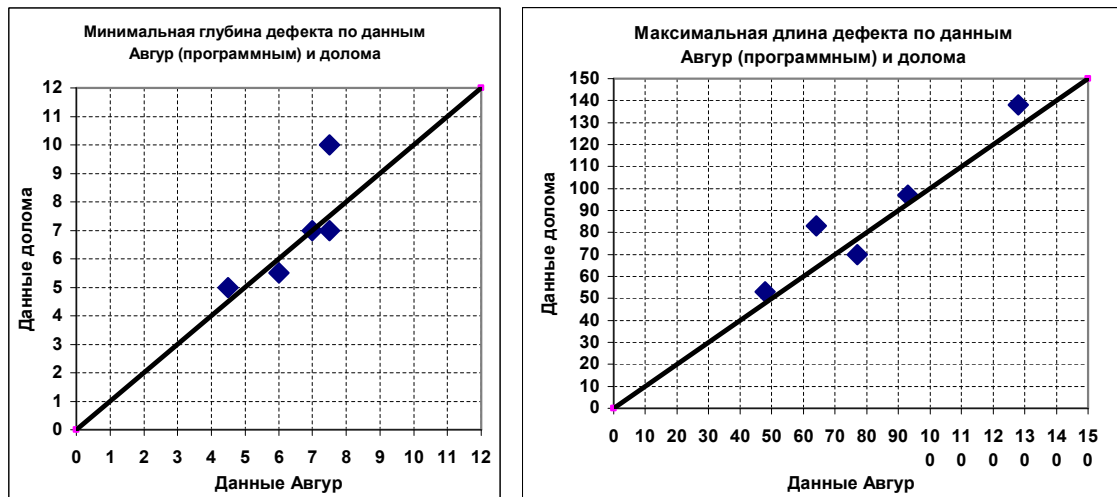
Были проведены аналогичные сопоставления результатов расчетов, выполненных с применением описываемой программы и измерений профиля дефекта после разрушающих испытаний методом трехточечного изгиба (долом). Эти данные представлены треугольными точками, соединенным сплошной линией на рис. 8.



**Рис. 8.** Профиль дефекта в сварном шве, полученный программно по данным, полученным системой Авгур (пунктирная линия) и при разрушающем контроле методом трехточечного изгиба (долом).

Здесь, как и на рис.7, отдельными точками (ромб) представлены «подозрительные точки». Одну из них (координата по Y= 472 мм) эксперт при оценке данных посчитал необходимым учесть. В целом данные неразрушающего и разрушающего контроля неплохо согласуются. Здесь точки, соединенные пунктирной линией определены программно. Как и на рис. 7 квадратные точки определяют верхнюю границу несплошности, кружки – нижнюю.

Необходимо отметить, что при выполнении расчетов на прочность используется информация о максимальной длине и высоте дефекта [9,10], тогда как при выполнении мониторинга сварных швов весьма существенным является знание профиля дефекта, так как появляется возможность следить за процессом развития дефекта и своевременно применять корректирующие действия [10].



а)

б)

**Рис. 9.** Данные измерений максимальной глубины и максимальной длины дефектов, полученных при разрушающем контроле и при программной обработке данных, полученных с использованием системы Авгур.

Результаты измерений максимальной длины и высоты дефектов, полученных при выполнении разрушающего контроля и при программной обработке данных неразрушающего контроля, дали сопоставимые значения (рис. 9).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены алгоритмы автоматизации различных режимов работы автоматизированной системы с когерентной обработкой данных. Эти алгоритмы предназначены для автоматической обработки результатов контроля изделий с высоким уровнем структурных шумов. Безусловно, при контроле таких материалов, как, например, стали перлитного класса с обычным соотношением сигнал /структурный шум, рассмотренные алгоритмы будут работать еще надежнее.
2. Испытания алгоритма **автоматического определения дефектных зон** при поисковом контроле трубопроводов различного диаметра показали эффективность его работы. Алгоритм является опцией в программное обеспечение системы Авгур 4.2. Кроме того, он интегрирован в программное обеспечение системы Авгур 5, что позволяет автоматически выбирать зоны измерительного контроля (экспертные зоны) и проводить в них регистрацию данных без участия оператора. При должной настройке параметров алгоритма возможно также автоматическое определение координат и условной длины несплошности.
3. Испытания алгоритма **определения параметров несплошностей** показали, что этот алгоритм позволяет определять координаты, тип несплошности (протяженная, непротяженная, объемная, плоскостная), ее реальную длину и высоту. Наличие априорной информации о преимущественном характере дефектов в изделии, их локализации позволяет определить контур дефекта. Приведены результаты испытаний этого алгоритма при контроле сварных швов трубопроводов с высоким уровнем структурных шумов.
4. Алгоритм **определения параметров несплошностей** не заменяет эксперта; он предназначен для помощи эксперту при выполнении количественной оценки параметров несплошностей и может исполнять роль «советчика» при оценке данных – решение о наличии несплошности и ее количественных характеристиках принимает эксперт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сыркин М.М. Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля. – Дефектоскопия, 2003, №3, с. 11 – 23.
2. Moreno R. M. Automatic Ultrasonic System - Nuclear and Conventional Applications. – NDTnet, 2003, v.8, N 3.
3. Бадалян В.Г., Вовилкин А.Х. Компьютерные системы для ультразвукового неразрушающего контроля. – Дефектоскопия, 1993, №5, с.7-13.
4. Schlengermann U. Determination of crack depth using ultrasonics - An overlook/ - NDTnet, 1997, v.2, N 5.
5. Бадалян В.Г., Вовилкин А.Х. Опыт применения ультразвуковой системы с когерентной обработкой данных «Авгур» на российских АЭС. – Контроль. Диагностика, № 9, 2000 С. 35-39.
6. Hassoun M.H. Fundamentals of artificial neural networks. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts; London, 1995.
7. Lawson Sh. Recent developments for automatic on-line TOFD inspection. - NDTnet, 1997, v.2, N 9.
8. Бадалян В. Погрешность измерения дефектов с использованием систем с когерентной обработкой данных. – Дефектоскопия, 2003, №3, с. 12 – 23.
9. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section 11: rules for in-service inspection of nuclear power plant components.
10. Методика расчета и нормы допускаемых размеров дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду300 КМПЦ РБМК (РД ЭО 0489-03)