

## Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС

Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Гребенников Д.В., Тихонов Д.С.

Применение методов сверхразрешения для обработки эхосигналов при проведении ультразвукового контроля весьма полезно для повышения достоверности экспертной оценки размера и вида дефекта при использовании систем экспертного голографического контроля серии «Авгур». Так, повышение качества изображения вследствие **трехкратного повышения**, в основном, лучевой разрешающей способности, позволит точнее определять размеры дефектов и достовернее проводить их классификацию. **Уменьшение спеклового шума**, связанное с увеличением полосы частот, так же можно рассматривать как один из положительных эффектов, применения методов экстраполяции. Использование методов сверхразрешения **повышает примерно в 1,7 раза** отношение сигнал/шум при получении изображения дефектов в материалах с сильным структурным шумом. В статье приведены результаты практического применения методов сверхразрешения при оценке размеров дефектов при проведении экспертного контроля сварных швов трубопроводов ДУ-300 атомных электростанций.

### 1. Введение

Методы ультразвуковой дефектоскопии широко применяются в различных отраслях промышленности для неразрушающего контроля оборудования. Основными недостатками традиционных методов ультразвуковой дефектоскопии является низкая достоверность и точность определения размеров дефектов, проблема их классификации. Кроме того, традиционный контроль не гарантирует правильное определение параметров наиболее опасных дефектов типа трещин, вследствие сложной природы дифракции ультразвука на них. Результатом этого является неоправданно жесткие нормы контроля, действующие в различных отраслях. Между тем, именно правильно определенный тип дефекта, его истинные размеры и местоположение дают возможность уверенно определить возможность эксплуатации и ресурс работы контролируемого объекта.

Появление современных методов дефектоскопии дает возможность реализовать логичный подход к анализу контролируемого объекта и обоснованной оценке ресурса работы конструкции, который состоит из нескольких этапов. **Первый** этап совпадает с традиционным, при котором ручным или автоматическим способом осуществляется выявление и регистрация эхосигналов от дефектов. На **втором** этапе осуществляется экспертный контроль с получением высококачественного трёхмерного изображения для определения типа, действительных размеров и ориентации дефектов. На **третьем** этапе производится расчет прочности сварного шва с учетом параметров выявленных дефектов и определяется ресурс работы всей конструкции.

К настоящему моменту, **первый** и **третий** этапы достаточно хорошо проработаны. Реализация **второго** этапа требует развития специализированного оборудования и программных средств. В НПЦ «Эхо+» разработана и изготавливается компьютерная система «Авгур 4.2»<sup>1</sup> предназначенная для проведения экспертного ультразвукового контроля. Ее принципиальное отличие от обычного дефектоскопа состоит в применении когерентной обработки эхосигналов для получения изображения дефектов. Суть **когерентного вос-**

**становления** состоит в пространственно-временной обработке эхосигналов с учетом их фазовых соотношений для восстановления изображения дефектов, которое можно было бы получить ультразвуковым фокусирующим преобразователем с пучком, не расходящимся по всей глубине контролируемого объекта. В результате, при использовании сдвиговой волны в стали на частоте 2,5 МГц фронтальная разрешающая способность изображения дефектов не зависит от глубины и равна 1,8 мм. Столь высокая разрешающая способность позволяет точно определять координаты, действительные размеры и тип дефектов, а также, следить за его развитием. Важное достоинство когерентных методов визуализации заключается также в существенном снижении требований к стабильности акустического контакта. Его ухудшение лишь увеличивает уровень шума в изображении и уменьшает разрешающую способность, но не приводит к его принципиальному искажению.

Однако даже указанные свойства изображения, полученного когерентным методом, не всегда позволяют принять верное решение при оценке размеров реальных дефектов, особенно, в изделиях малой толщины, таких как сварные швы трубопроводов ДУ-300 имеющих толщину около 15 мм. Применение методов сверхразрешения увеличивает полосу частот спектра эхосигналов, что позволяет дополнительно повысить качество изображения дефектов за счет повышения лучевой разрешающей способности и уменьшения спеклового шума. Высокая точность определения размеров дефектов особенно важна при выполнении повторного экспертного контроля, когда особую актуальность приобретает вопрос оценки развития дефекта. Отметим, что при контроле аустенитных материалов повышение частоты зондирующих импульсов приводит к увеличению уровня структурного шума и, как следствие, к ухудшению качества изображения.

В работе приведены результаты практического применения методов сверхразрешения оценки размеров дефектов при проведении экспертного контроля сварных швов трубопроводов ДУ-300 атомных электростанций.

## 2. Краткое описание методов сверхразрешения

### 2.1 Принципы достижения сверхразрешения

Достижения сверхразрешения, то есть повышения разрешения акустических изображений выше рэлеевского разрешения, можно добиться либо за счет дополни-

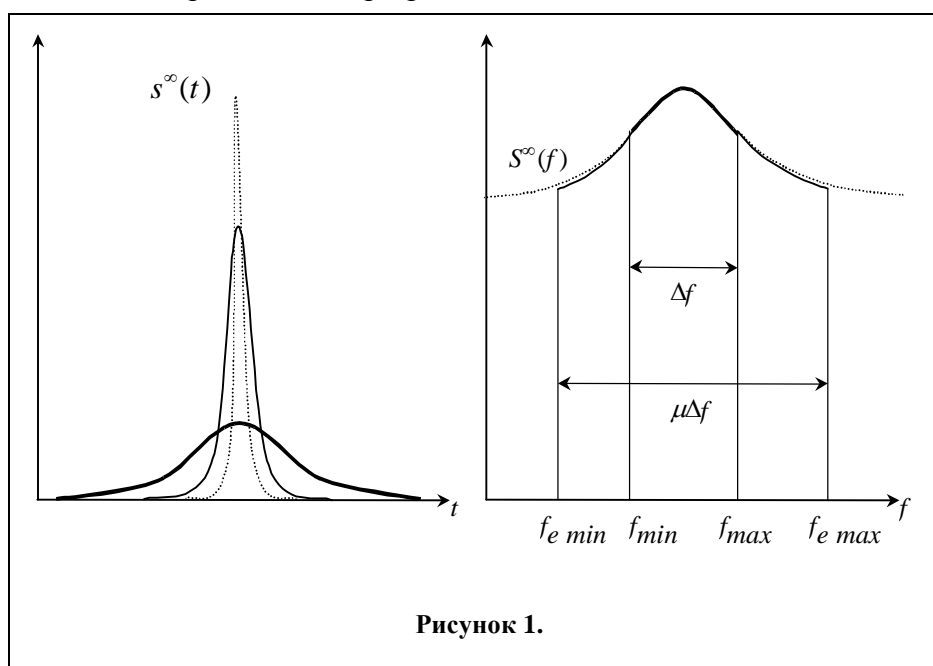


Рисунок 1.

тельной обработки измеренных эхосигналов, по которым осуществляется восстановление изображений, либо за счет дополнительной обработки восстановленного изображения. В настоящей работе использованы алгоритмы **дополнительной обработки эхосигналов** методами AR-модели (autoregressive method)<sup>2,3</sup> и адаптивной экстраполяции<sup>10</sup>.

Эти методы экстраполяции позволяют получить сверхразрешение за счет существенного расширения спектров эхосигналов, что эквивалентно уменьшению длительности сигнала.

Принцип получения сверхразрешения при экстраполяции спектров эхосигналов пояснен на рис.1. Как известно, приемно-передающий тракт любой системы визуализации, обладая конечной полосой пропускания  $\Delta f$ , искажает идеальный исходный эхосигнал  $s^\infty(t)$  с неограниченным спектром  $S^\infty(f)$  (на Рисунок 1 изображены пунктирной линией). Поэтому, измеренный эхосигнал  $s(t)$ , (на Рисунок 1 утолщенной линией), имеет ограниченную ширину спектра  $\Delta f$  и, следовательно, большую длительность во времени. Достижение сверхразрешения заключается в экстраполяции спектра измеренного сигнала на больший частотный интервал  $\mu\Delta f$ , для того чтобы получить оценку сигнала, представленную простой линией слева на Рисунок 1, близкую к  $s^\infty(t)$ . Значение коэффициента  $\mu$  определяет величину повышения лучевой разрешающей способности. Применение методов экстраполяции для обработки эхосигналов позволяет повысить лучевую разрешающую способность изображения в три и более раз.

## 2.2 Метод построения AR-модели спектра эхосигнала

Этот метод повышения спектрального разрешения в теории спектрального оценивания применяется достаточно широко, так как он позволяет построить линейную стационарную модель сигнала. Известны реализации этого метода для повышения поперечного разрешения при экстраполяции акустических голограмм на большую апертуру при расположении неоднородностей в дальней зоне апертуры голограммы<sup>4,5</sup> или в зоне Френеля<sup>6</sup>. Оценка параметров AR-модели представляет собой нетривиальную и достаточно сложную процедуру и требует испытания моделей нескольких порядков. Применение данного метода наиболее эффективно для сигналов со спектром из дискретных составляющих<sup>2</sup>. Именно по этой причине экстраполяция спектра эхосигнала состоящего из набора импульсов более эффективно с использованием AR-модели.

Для оценки коэффициентов AR-модели часто используется метод Берга и ковариационный модифицированный метод. Экстраполяция спектра при использовании коэффициентов AR-модели рассчитанных по методу Бергу устойчива в сравнении с оценкой коэффициентов AR-модели модифицированным ковариационным методом. Но при его использовании метод Берга возможно появление «паразитных» импульсов.

## 2.3 Метод адаптивной экстраполяции

Для экстраполяции спектров эхосигналов применяются итерационные алгоритмы с ограничениями, в которых используется априорная информация о свойствах экстраполируемых функций<sup>7</sup>. Гершбергом Р.<sup>8</sup> и Папулисом А.<sup>9</sup> был предложен итерационный алгоритм, позволяющий экстраполировать функцию за пределы заданного интервала  $L$  при условии финитности ее спектра. Модификация этого метода, известная как метод адаптивной экстраполяции<sup>10</sup>, позволила в численном эксперименте улучшить разрешающую способность в 2-3 раза при анализе сигналов. В работах<sup>11, 12</sup> данный метод применялся для повышения продольного разрешения изображения дефек-

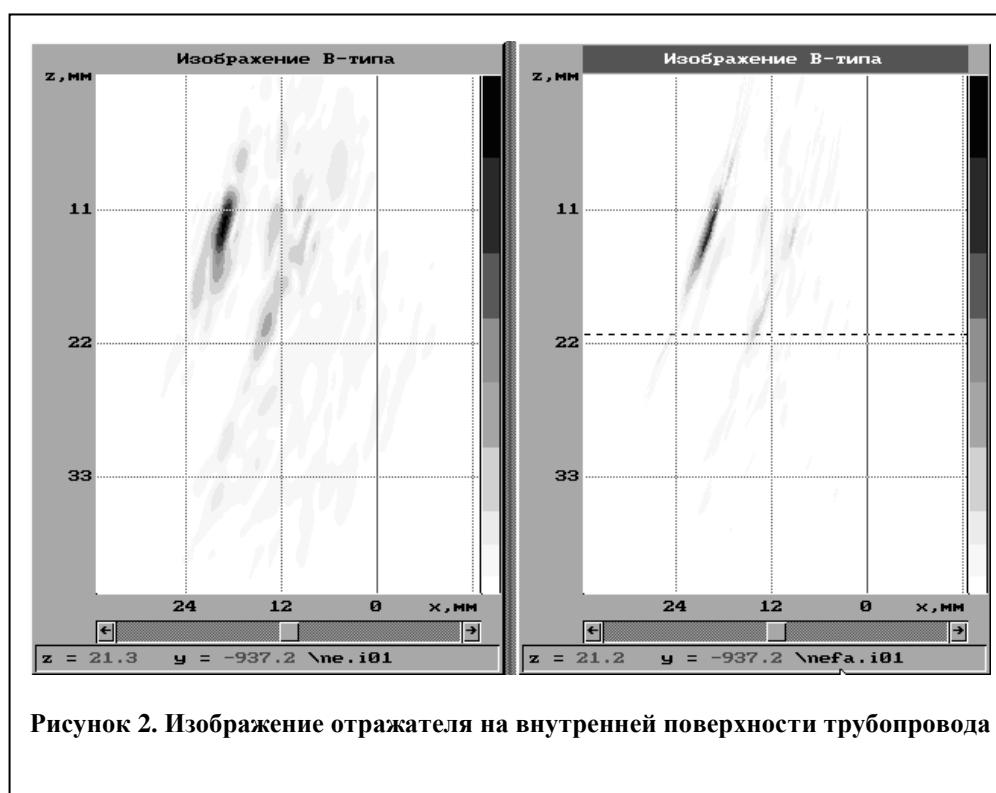
тов. При реализации метода адаптивной экстраполяции используются операции быстрого преобразования Фурье, операции отсечки, что при достаточно быстрой сходимости делает его очень удобным в программной реализации на профессиональном компьютере. В работах<sup>13,14</sup> методы сверхразрешения применяются для анализа «тонкой» структуры эхосигналов, которые при использовании обычных акустических преобразователей не разрешаются.

### **3. Применение методов сверхразрешения для повышения разрешающей способности изображения дефектов**

В этом разделе приведены экспериментальные данные, полученные и обработанные с помощью цифрового когерентного дефектоскопа «Авгур 4.2ТМ» при экспертном ультразвуковом контроле аустенитных сварных швов трубопроводов ДУ-300. Контроль проводился на атомных электростанциях России в 1997 и 1998 годах. Все изображения были получены в результате когерентной обработки эхосигналов, зарегистрированных в совмещённом режиме преобразователем с углом ввода в сталь 70 градусов.

#### **3.1. След инструмента поверхностной обработки**

На рисунке 2 слева приведен срез изображения В-типа отражателя, расположенного на внутренней поверхности трубы. На фоне структурного шума хорошо заметны два сигнала. Сигнал наибольшей амплитуды на глубине около 12 мм соответствует отражению на прямом луче от дефекта внутренней поверхности трубы, второй сигнал, появляющийся на глубине около 20 мм, соответствует трансформированной на этом же дефекте волне, но отраженной от неровностей внешней поверхности трубы.



Проблема экспертной оценки отражателя состоит в выяснении ответа на вопрос - имеет ли этот отражатель развитие по высоте в толщу трубы? или - не является ли отражатель поверхностной трещиной? Характерным признаком поверхностной трещины является наличие дифракционных сигналов, расположенных по глубине выше

сигналов от корня трещины. Если трещина имеет малую высоту, то дифракционные сигналы от верхней кромки могут сливаться в одно "пятно" сформированное сигналами корня шва и не разрешаться друг от друга. К тому же, в материалах с высоким уровнем структурных шумов, сигнал шума может быть ложно истолкован как изображение дефекта. Повышение разрешающей способности, за счёт применения методов сверхразрешения позволяет облегчить решение этой проблемы. На рисунке 2 справа приведен В-срез изображения того же отражателя, но после экстраполяции спектров эхосигналов при построении AR-модели с оценкой коэффициентов модели методом Берга. Это позволило увеличить лучевое разрешение изображения примерно в три раза при отсутствии какого-либо ложного дублирования сигнала. Кроме этого заметно увеличилось отношение сигнал/структурный шум. Анализ обработанного изображения В-типа вместе с изображениями С-типа и D-типа указывает, что на внутренней поверхности имеется углубление значительной длины и высотой менее 0,2 мм, похожее на след инструмента, оставшийся после поверхностной обработки.

Процедура экстраполяции, в зависимости от уровня шума и качества измерения эхосигналов, может давать ошибочные результаты. Поэтому для повышения достоверности полученного результата экстраполяция спектра эхосигналов проводилась при построении AR-модели с оценкой коэффициентов модели модифицированным ковариационным методом и методом адаптивной экстраполяции. В том случае, если при использовании всех трех методов достигался примерно одинаковый результат, полагалась что результаты экстраполяции верны.

### 3.2. Изображение поверхностной трещины

На рисунке 2 представлена другая ситуация, когда применение методов сверхразрешения позволяет обнаружить раздвоение сигнала от корня и вершины придонной трещины. Анализ изображения В-типа вместе с изображениями С-типа и D-типа

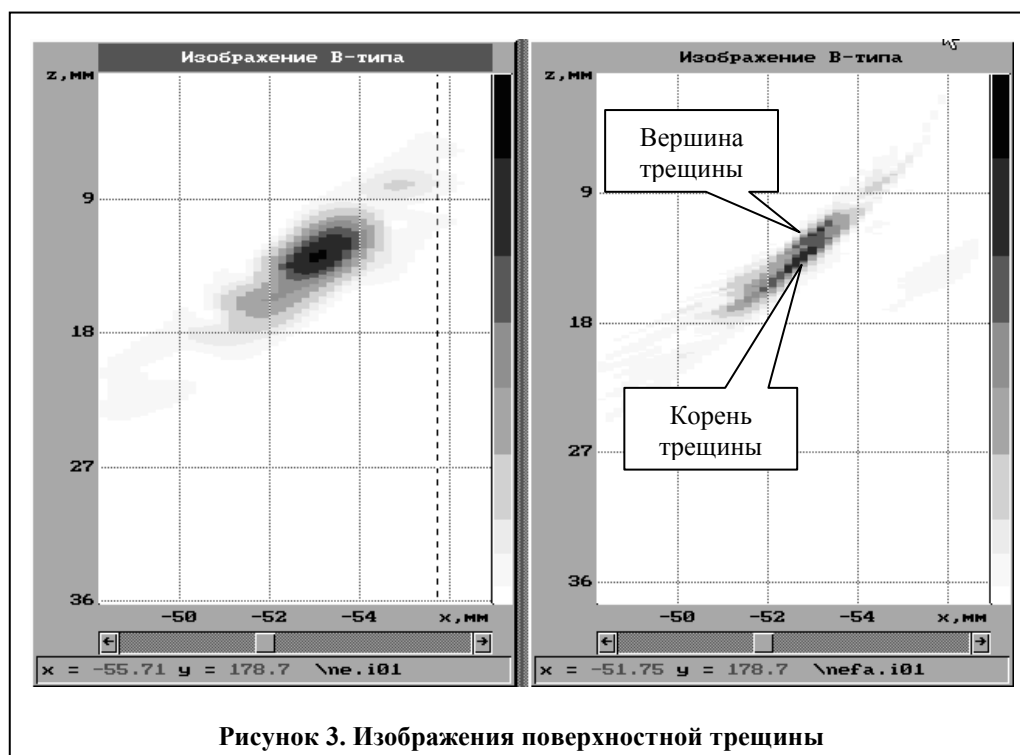


Рисунок 3. Изображения поверхностной трещины

показывает, что раздвоение соответствует реальной ситуации, а не неточностями ал-

горитма экстраполяции. Можно предположить, что была обнаружена придонная трещина длиной 44 мм и высотой около 0,5 мм.

#### **4.Повышения отношения сигнал/шум в материалах со структурным шумом**

Кроме очевидного повышения качества изображения дефектов за счет повышения продольного разрешения применение методов экстраполяции может привести к повышению отношения сигнал/шум. Это является следствием того, что экстраполяцию спектра эхосигнала можно рассматривать, как нелинейный детектор формы сигнала.

Если входной сигнал  $s_{ex}(t)$  состоит из нескольких разных сигналов

$$s_{ex}(t) = \sum_i s_i(t),$$

то, используя инверсный фильтр с частотной характеристикой

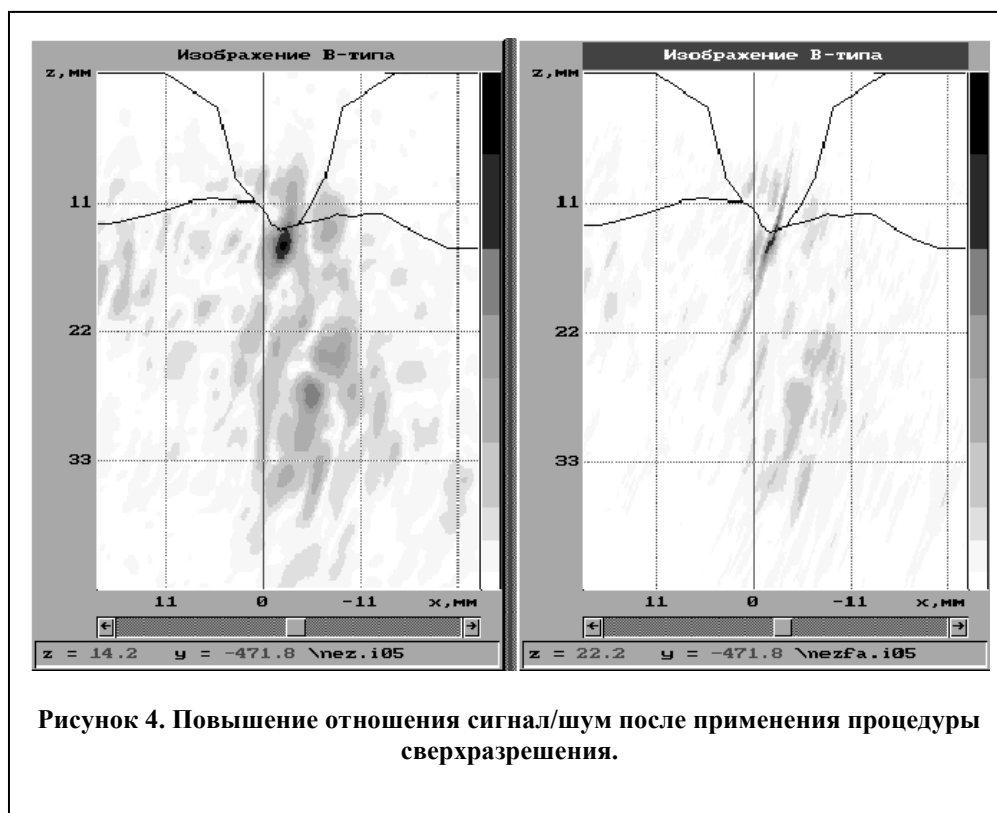
$$B(f) = \frac{1}{F[s_m(t)]},$$

можно добиться того, что на выходе сигнал  $s_m(t)$  будет иметь максимальную энергию и форму типа  $\sin(x)/x$ . Это обстоятельство позволяет рассматривать инверсную фильтрацию как детектор сигналов заданной формы. Как указывалось в работе<sup>11</sup>, эффективно экстраполируются эхосигналы после приведения их к виду  $\sin(x)/x$  с помощью инверсной фильтрации. Следовательно, детектирующий эффект инверсной фильтрации усилится, так как только такие сигналы будут эффективно «сужаться» и иметь амплитуду большую нежели сигналы иной формы.

Иначе говоря, процедуру экстраполяции можно рассматривать как нелинейный фильтр эхосигналов по их форме. Данное свойство методов экстраполяции приводит к тому, что импульсы, связанные с трансформацией волн и перерасеиванием, отличаются от эталонного сигнала и, чем больше это отличие, тем хуже они будут сжиматься в сравнении с однократно рассеянными эхосигналами.

#### 4.1. Повышения отношения сигнал/шум в аустенитных сварных швах.

Данные рассуждения были подтверждены результатами измерений и обработки эхосигналов в сварном шве трубопровода ДУ-300. Измеренные данные содержат значительные структурные сигналы, связанные с аустенитной структурой сварного



шва, затрудняющие анализ изображений. Амплитуда отдельных шумовых сигналов на изображении может быть сравнима с амплитудой сигналов от дефектов и донной поверхности. Чтобы отличить шумовые сигналы от реальных отражателей использовалась априорная информация и ряд особенностей, присущих изображениям структурных отражателей.

На левом окне рисунка 4 показано исходное восстановленное изображение рассеивателей и контуры аустенитного шва трубопровода ДУ-300. Самый яркий блик на глубине 13 мм соответствует изображению провисания в корне шва, а изображение, сформированное сигналами структурного шума, находится ниже на глубине от 20 до 35 мм в области зеркально отраженных эхосигналов. В правом окне показан результат применения методов сверхразрешения при использовании AR-модели с оценкой коэффициентов методом Берга. Отношение сигнал/шум в этом случае увеличилось в два раза. Анализ данных по этому шву позволяет сделать вывод о том, что применение метода сверхразрешения увеличивает отношение сигнал/шум в среднем в 1,7 раза.

## 5. Выводы

В данной статье показано, что применение методов сверхразрешения при оценке размеров реальных дефектов, особенно, в изделиях малой толщины, таких как сварные швы трубопроводов ДУ-300 в результате нелинейной обработки увеличивает полосу частот. Это позволяет дополнительно повысить качество когерентного изображения дефектов за счет **трехкратного повышения** лучевой разрешающей способности, **уменьшения**

**спеклового шума и повышения отношения сигнал/структурный шум** примерно в 1,7 раза. Более высокая точность определения размеров дефектов позволяет точнее провести прочностные расчеты по определению ресурса шва. Особенно эффективно применение методов сверхразрешения может оказаться при проведении повторного экспертного контроля, когда особую актуальность приобретает вопрос оценки развития трещины.



## **6. Список литературы**

- <sup>1</sup> Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Бычков И.В., Вopilкин А.Х., Каплун С.М., Ломакин А.В., Пентюк М.В., Рубен Е.А., Тихонов Д.С., Штерн А.М. Компьютерная система ультразвукового контроля с когерентной обработкой данных "Авгур 2.1".- Дефектоскопия, 1993, №7, с. 3-15
- <sup>2</sup> Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ: пер. с англ. - М.: Мир, 1990. С. 584.
- <sup>3</sup> Box G.E., Jenkins G.M. Time serial analysis. Forecasting and control. San-Francisco. Holden-dey. 1970
- <sup>4</sup> Abdel-Aal R.E., Macleod C.J., Durrani T.S. Expansion of acoustic hologram aperture using ARMA modelling techniques.- Acoustical Imaging, 1982, V. 12, P. 679-707
- <sup>5</sup> Takuso Sato, Takayoshi Yokota, Osameu Ikeda An optimum ultrasonic imaging system using ARMA processing.- Acoustical Imaging, 1981, V. 11, p. 289-308
- <sup>6</sup> Pao Yoh-han, Glen V., El-sherbini A. High resolution ARMA model reconstruction for NDE ultrasonic imaging.- Rev. progr. qant. NDT, 1983, V. 2B, P. 1625-1641
- <sup>7</sup> Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986.-с. 304.
- <sup>8</sup> Gershberg R.W. Super resolution through error energy reduction.- Opt. acta., 1974, V. 21, P. 709-720
- <sup>9</sup> Papoulis A. A new algorithm in spectral analysis and band-limited extrapolation.-IEEE Trans. circuits system, 1975, CAS-22, № 9, P. 735-742.
- <sup>10</sup> Papoulis A., Chamras D. Detection of hidden periodicities by adaptive extrapolation.-IEEE Trans. Acoust. speech signal proc, 1979, ASSP-27, № 25, P. 492-500.
- <sup>11</sup> Базулин Е.Г. Экстраполяция спектров эхосигналов для получения изображения дефектов с продольным сверхразрешением. - Дефектоскопия, 1993, №1, с. 22-29
- <sup>12</sup> Lasaygues P., Lefebvre J.-P. Improvement of resolution in ultrasonic reflection tomography. – 7<sup>th</sup> European conference on nondestructive testing, Copenhagen, 26-29 may 1998, P. 3001-3008
- <sup>13</sup> Faur M., Morisseau P., Poradis L. Ultrasonic data inversion for outer surface defects characterization. – 7<sup>th</sup> European conference on nondestructive testing, Copenhagen, 26-29 may 1998, P. 2429-2436
- <sup>14</sup> Базулин Е.Г. Применение методов сверхразрешения для анализа “тонкой” структуры вертикально ориентированных подповерхностных трещин. - Дефектоскопия, 1995, №10, с. 9-13