

## **О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности эхосигналов**

А.Е. Базулин, Е.Г. Базулин

РНЦ «Курчатовский институт», ООО «Научно-производственный центр «Эхо+»

123182, Москва, пл. Курчатова, д. 1

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

В статье рассматривается задача деконволюции эхосигналов с применением регуляризации методом максимальной энтропии, с последующим восстановлением двумерных изображений методом проекции в спектральном пространстве (ПСП). Проведено численное и экспериментальное моделирование. Продемонстрирована возможность повышения лучевого разрешения эхосигналов и понижения уровня спеклового шума. Проведено сравнение полученных результатов с результатом построения AR-модели спектра эхосигналов.

### **1. Введение**

Методы ультразвуковой дефектоскопии широко применяются в различных отраслях промышленности для неразрушающего контроля оборудования. Новая технология контроля позволяет определить тип и размеры дефекта, рассчитать прочностной ресурс изделия и сделать вывод о целесообразности его ремонта или продолжения эксплуатации [1]. Получение изображения дефектов с высокой разрешающей способностью осуществляется системами с когерентной обработкой измеренных эхосигналов. Так, в России для экспертного контроля сварных швов трубопроводов атомных электростанций используются системы серии «Авгур» [2, 1], а за рубежом для контроля ответственных конструкций применяются, например, системы «Masera» фирмы «Technoatom» и «μ+» фирмы «Sonomatic». В них для получения изображения дефектов используются алгоритмы, основанные на решении обратной скалярной задачи рассеивания в Борновском приближении [3]. К алгоритмам такого класса относится метод **Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)** [4, 5, 6, 7] и метод **Проекции в Спектральном Пространстве (ПСП)**, который в зарубежной литературе называется **Fourier Transformation Synthetic Aperture Focusing Technique (FT-SAFT)** [8, 9,

10]. Последний метод позволяет с высокой скоростью получать изображения дефектов. Изображения, восстановленные с помощью упомянутых алгоритмов, могут оказаться весьма полезными при решении задачи определения типа и размеров дефекта, а, следовательно, его потенциальной опасности [11].

Изображения дефектов, полученные с помощью упомянутых систем, дают принципиально больший объем информации для оператора, чем данные ручного контроля, полученные с помощью стандартных методик анализа амплитуды одного эхосигнала. Тем не менее, задача повышения качества изображений актуальна и может решаться различными способами, один из которых заключается в предварительной обработке эхосигналов с целью повышения разрешающей способности и повышения отношения сигнал/шум.

При когерентной обработке эхосигналов, измеренных вдоль линии, предельное фронтальная (поперечная) разрешающая способность  $R_x^{\text{lim}}$  (разрешение по Релею [12]) определяется длиной волны  $\lambda$  на резонансной частоте и половиной угла раскрыва преобразователя  $\varphi_{\text{max}}$  и для совмещенного режима равна

$$R_x^{\text{lim}} \approx \frac{\lambda}{4 \sin(\varphi_{\text{max}})}.$$

Предельная лучевая (продольная) разрешающая способность  $R_z^{\text{lim}}$  зависит от резонансных свойств преобразователя и равна, как минимум половине длины излученного импульса

$$R_z^{\text{lim}} \approx \frac{c}{2 \Delta f},$$

где  $c$  - скорость звука в среде,  $\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$  ширина полосы пропускания.

В дальнейшем под изображениями со сверхразрешением будем подразумевать изображения с разрешающей способностью превышающей критерий Рэля, то есть  $R_x < R_x^{\text{lim}}$  или  $R_z < R_z^{\text{lim}}$ .

Повышение разрешающей способности при переходе на более высокую частоту  $f$  может оказаться не всегда возможным в материалах с большим затуханием или структурным шумом. А уменьшение уровня спеклового шума за счет увеличения полосы пропускания  $\Delta f$  преобразователя представляет значительные технологические сложности [13]. Вместе с тем, существуют методы экстраполяции функций одной переменной, которые позволяют рассчитать спектр зарегистрированных эхоимпульсов в более широкой полосе частот  $w\Delta f = f_{\max}^{extr} - f_{\min}^{extr}$ , и, следовательно, повысить разрешающую способность в  $w$  раз.

Для повышения спектрального разрешения в теории спектрального оценивания широко применяется метод **autoregressive moving-average method** (ARMA) [14, 15], позволяющий построить линейную стационарную модель сигнала. Известны реализации этого метода для экстраполяции акустических голограмм при расположении дефектов в дальней зоне апертуры приема [16, 17] или в зоне Френеля [18] с целью повышения поперечного разрешения изображения, а также для повышения продольного разрешения при экстраполяции спектров эхосигналов [19, 20]. Статьи [21, 22] посвящены анализу «тонкой» структуры импульсов отраженных от вертикально ориентированной трещины в толще металла.

Особое место среди методов повышения качества изображений занимает так называемый **Метод Максимальной Энтропии** (ММЭ). Обоснование и первые практические результаты были получены Эдвином Джейнсом [23], который продемонстрировал возможность использования Шенноновский энтропии [24] в задачах нечеткого вывода при неполной информации.

В статье [25] была показана возможность использования Шенноновский энтропии, как стабилизирующего функционала в контексте метода регуляризации Тихонова [26]. Продемонстрирована возможность достижения сверхразрешения в системе получения изображений (одномерный случай, система формирования с дифракционным ограничением). Исследования показали эффективность практического применения ММЭ при восстановле-

нии изображений в томографии [27, 28, 29], радиоастрономии [30, 31], ядерном магнитном резонансе [32], а также и в ультразвуковом контроле [33, 34]. Основные свойства изображений, получаемых ММЭ описаны в [30, 33]:

- алгоритм успешно восстанавливает изображения из сильно зашумленных и неполных данных, полученные изображения обладают высоким отношением сигнал/шум;
- за счет нелинейности алгоритма при получении изображений может быть достигнуто сверхразрешение в результате появления в спектре изображения компонент, не обусловленных лишь исходной неполной информацией;
- при восстановлении изображения автоматически накладывается ограничение на неотрицательность его элементов (за счет логарифма в выражении для энтропии).

Отмечено [15], что оценка спектральной плотности мощности сигнала получаемая с помощью **autoregressive method** (AR-модели) и спектральная плотность мощности, получаемая методом максимальной энтропии [35] идентичны в случае описания сигнала, как гауссовского случайного процесса и известной автокорреляционной последовательностью с равноотстоящими значениями.

В статье рассматривается задача деконволюции эхосигналов (обращение свертки сигнала с импульсной характеристикой прибора) с применением регуляризации методом максимальной энтропии, с последующим восстановлением двумерных изображений методом проекции в спектральном пространстве (ПСП). Проведено численное и экспериментальное моделирование. Продемонстрирована возможность повышения лучевого разрешения эхосигналов. Проведено сравнение полученных результатов с результатом построения AR-модели спектра эхосигналов.

## Постановка задачи

Если известен эталонный сигнал  $s_e(t)$ , который характеризует передаточную функцию измерительной системы и среды распространения ультразвука, то измеренный эхосигнал  $s(t)$  можно записать в виде уравнения свертки:

$$s(t) = s_e(t) \otimes f(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $f(t)$  - функция представляющая собой набор функций  $\delta(t - t_{del})$ , соответствующих отражению эхоимпульса от точечного рассеивателя, с временем задержки  $t_{del}$ , а  $n(t)$  - аддитивный гауссовый шум. Значения  $f(t)$  могут быть положительными и отрицательными, что, например, отвечает отражению от верхней и нижней границы висячей околоповерхностной трещины. Следует сразу отметить, что рассмотренная модель очень груба, достаточно указать на тот факт, что в зависимости от отклонения от оси пьезопреобразователя форма сигнала  $s_e(t)$  будет изменяться [36].

По теореме о свертке [38] можно записать то же выражение в Фурье пространстве

$$S(\omega) = S_e(\omega)F(\omega) + N(\omega),$$

$S(\omega)$  - спектр измеренного эхосигнала  $s(t)$ ,  $S_e(\omega)$  - спектр эталонного сигнала  $s_e(t)$ ,  $F(\omega)$  - спектр искомой функции  $f(t)$ ,  $N(\omega)$  - спектр шума  $n(t)$ . Восстановление  $f(t)$  методами спектральной фильтрации не позволяет достичь сверхразрешения, так как при ненулевом уровне шума нет возможности линейными методами получить значимое расширение спектра эхосигнала.

Формулу прямой задачи (1) можно записать в матричном виде

$$s = Gf + n,$$

где  $s$  - вектор длиной  $N$  отсчетов, содержащий измеренный эхосигнал,  $G$  - циклическая матрица ( $N \times N$ ), столбцы которой сформированы эталонным эхосигналом  $s_e(t)$  со сдвигом во времени, а  $f$  - неискаженная функция, которую требуется восстановить. Здесь про-

извлечение  $Gf$ , соответствующее вычислению свертки, может быть заменено вычислением свертки в Фурье пространстве [38].

Такая запись позволяет перейти к поиску оценки  $f$  методом наименьших квадратов (МНК), путем минимизации невязки:

$$C(f) = \|Gf - s\|^2 \rightarrow \min_f \quad (2)$$

Для квадратной матрицы  $G$  решение МНК аналогично решению обращением матрицы, и при плохой обусловленности матрицы и наличии аддитивного шума на практике приводит к неединственности решения с неудовлетворительным отношением сигнал/шум, хотя и с высоким разрешением при несущественных уровнях шума.

Дальнейшее развитие данного подхода состоит в регуляризации процедуры обращения методом максимальной энтропии [33]. Для этого к критерию невязки решения (2) добавляется функционал с параметром регуляризации  $\alpha$ .

$$J(f) = \|Gf - s\|^2 + \alpha\Omega(f) \rightarrow \min_f$$

Вид регуляризирующего функционала  $\Omega(f)$  в форме отрицательной энтропии  $-H(f)$  может быть различным, поскольку имеется целое семейство функционалов, дающих схожие результаты [30]. При выполнении данной работы использовалась кросс-энтропия (другие названия: условная энтропия [24], относительная энтропия [30], расстояние Кульбека-Лейблера [37]):

$$H(f_i) = -\sum_{i=1}^N f_i \ln \frac{f_i}{e\mu},$$

где  $N$  - количество отсчетов в сигнале,  $\mu$  - оценка фоновой амплитуды сигнала,  $f_i$  - отсчет изображения.

Повышение разрешающей способности можно объяснить следующим несложным образом, предложенным Джейнсом [23]. Так как максимум энтропии достигается при

$f_i = const$ , то в сочетании с критерием (2), ММЭ дает оценку эхосигнала, в которой присутствует максимальное количество отсчетов, близких по амплитуде к нулю, при трансформации исходного эхосигнала в дельта-импульс.

Логарифм в критерии максимальной энтропии, как отмечается в [38] служит дополнительной возможностью предотвратить появление элементов с отрицательными значениями в восстанавливаемом изображении, однако при решении задачи деконволюции эхосигналов, восстанавливаться должны двуполярные сигналы. Для адаптации критерия максимальной энтропии к данным с отрицательными или комплексными значениями существуют различные подходы, указанные, например в [33]. В данной статье используется расчет энтропии для модуля сигнала, аналогичный примененному авторами при восстановлении комплексных изображений по голограммам [34]. Будем рассчитывать энтропию модуля вектора  $f$ :

$$z_i = |f_i| = \sqrt{(f_i)^2}, \quad (3)$$

$$H(f_i) = -\sum_{i=1}^N z_i \ln \frac{z_i}{e\mu}$$

В этом случае элементы градиента и Гессиана энтропии выглядят следующим образом<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial H(f_i)}{\partial f_i} = -\frac{f_i \ln\left(\frac{z_i}{\mu}\right)}{z_i}; \quad \frac{\partial^2 H(f_i)}{\partial (f_i)^2} = -\frac{f_i}{z_i^3}$$

В некоторых случаях более предпочтительным оказывается расчет энтропии квадрата оценки изображения [39]:

$$H(f_i) = -\sum_{i=1}^N f_i^2 \ln \frac{f_i^2}{e\mu}. \quad (4)$$

Тогда элементы градиента и Гессиана энтропии выглядят следующим образом:

<sup>1</sup> Отметим, что гессиан представляет собой диагональную матрицу, что упрощает программирование алгоритма за счет хранения только диагональных элементов.

$$\frac{\partial H(f_i)}{\partial f_i} = -2f_i \ln\left(\frac{f_i^2}{\mu}\right), \quad \frac{\partial^2 H(f_i)}{\partial (f_i)^2} = -2 \ln\left(\frac{f_i^2}{\mu}\right) - 4$$

Итак, решение задачи восстановления сводится к минимизации следующего комбинированного критерия:

$$J(f) = \|Gf - s\|^2 - \alpha H(f) \rightarrow \min_f$$

Использование критерия относительной энтропии позволяет обойти одну проблему, связанную с использованием критерия максимальной энтропии. Дело в том, что при приближении части значений интенсивностей изображения к нулю логарифм в выражении для градиента энтропии принимает слишком большие значения, что мешает сходимости к изображениям с нулевым фоном. В рассматриваемом случае элементы градиента энтропии будут близки к нулю для интенсивностей, близких к  $\mu$ .

Для получения решения использовался алгоритм решения задач оптимизации большой размерности, использующий квадратичную аппроксимацию критерия на каждой итерации с оценкой доверительного интервала [40]. Для эффективного применения ММЭ при обработке больших массивов данных в 1980-х годах был разработан специальный быстрый и устойчивый алгоритм, так называемый Кембриджский алгоритм [41]. В работе [33] для восстановления изображений дефектов по многочастотным голограммам ММЭ модифицирован для комплексной метрики.

Основная сложность применения метода регуляризации состоит в выборе параметра регуляризации  $\alpha$ , устанавливающего соответствие между требованием на стабильность решения и удовлетворением решением исходных данных. Существуют различные способы выбора параметра регуляризации [26, 42, 43]: метод невязки, метод L-кривой, способ ортогональности и другие. Часть методов требует точной оценки дисперсии аддитивного шума, часть из-за итеративности увеличивают время вычисления. При проведении расчетов в данной работе использовался алгоритм, названный авторами адаптивным [34]. Способ вы-

бора оптимального параметра регуляризации основан на его адаптивной оценке в каждой итерации процесса оптимизации, исходя из требования равенства норм градиентов невязки решения и регуляризирующего функционала на каждом шаге процесса оптимизации (то есть выполнение необходимых условий экстремума):

$$\alpha_{i+1} = -\gamma \frac{\|\nabla \chi^2(f_i)\|}{\|\nabla H(f_i)\|}.$$

Параметр  $\gamma$  оказывает влияние на скорость сходимости и, в общем случае, зависит от выбранной фоновой интенсивности  $\mu$  и подбирается эмпирически. Обычно множитель принимает значения в диапазоне  $[0.2 \dots 1]$ . Основной методической проблемой практического применения ММЭ в настоящий момент является выбор параметров алгоритма: оценка фоновой амплитуды  $\mu$  и параметра регуляризации  $\alpha$ .

Модель прямой задачи может быть модифицирована так, чтобы учесть зависимость формы эталонного сигнала от расстояния по лучу. Например, можно учесть дисперсию или изменение спектра сигнала после отражения от границ объекта контроля. Но в этом случае затрудняется возможность вычислять свертку в Фурье-пространстве. Модель также может учитывать многократное перерасеяние импульсов и другие эффекты распространения и рассеивания ультразвука. Чем более подробно будет описана модель задачи излучения, распространения и рассеивания ультразвука, тем более высокое качество изображения может быть достигнуто.

## Численный эксперимент

При расчете эхосигналов предполагалось, что преобразователь с резонансной частотой 2.5 МГц излучал и принимал радиоимпульсы с прямоугольной огибающей длиной 1 мкс. Преобразователь, считался идеальным, то есть время нерасхождения, высота мнимой пьезопластины и стрела были равны нулю [44], а пьезопластина имела нулевые размеры. Пять точечных отражателей располагались в точках с координатами (3.0, 3.0), (2.5, 2.5), (1.5, 1.5), (0.0, 0.0) и (-3.0, -3.0) мм в абсолютной системе координат. Расстояние от линии регистрации эхосигналов до центра абсолютной системы координат составляет 25.0 мм. Временная апертура состояла из 512 отсчетов с интервалом 0.025 мкс. Уровень шума считался равным нулю.

Для моделирования использовался специальный модуль программного обеспечения системы «Авгур 5», позволяющий рассчитывать эхосигналы от набора точечных рассеивателей, с учетом многократного перерасеяния и трансформации волн.

На Рис. 1 вверху представлены исходные модельные эхосигналы, внизу полученные после обработки их ММЭ. Для расчета энтропии использовался модуль вектора  $f$ , согласно формуле (3). Параметры обработки были таковы: было выполнено 100 итераций,  $\gamma = 0.4$ ,  $\mu = 10^{-10}$ , все исходные эхосигналы нормировались к единице по глобальному максимуму из всех эхосигналов. Лучевая разрешающая способность возросла более чем в десять раз, что позволило уверенно разрешить импульсы, удаленные друг от друга на 0.1 мкс и более.

Рис. 1

Эхосигналы, полученные после обработки ММЭ исходных данных, будут называться ММЭ-эхосигналами, а AR-эхосигналами будут называться эхосигналы после экстраполяции их спектра при построении его AR-модели. Изображения, полученные по таким эхосигналам, будут называться аналогично.

На Рис. 2 представлены эхосигналы после экстраполяции спектра эхосигналов на основе его AR-модели (AR-сигналы) со следующими параметрами экстраполяции ( $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\min} = 1.5$  МГц;  $f_{\max} = 3.5$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 15$  МГц; оценка коэффициентов по методу Юла-Уокера [15]; порядок модели 26). Сигналы были инверсно профильтрованы в диапазоне  $f_{\min} = 1.5$  МГц,  $f_{\max} = 3.5$  МГц. После экстраполяции, то есть расширения спектра с физически определенного частотного интервала  $[f_{\min}, f_{\max}]$  на больший интервал  $[f_{\min}^{extr}, f_{\max}^{extr}]$ , лучевое разрешение возросло примерно в пять раз. Однако разрешить два самых близкорасположенных импульса не удалось ни в одной точке пространственной апертуры.

На Рис. 3 вверху приведены изображения, восстановленные по рассчитанным эхосигналам из файла, ниже изображение, полученное по ММЭ-эхосигналам, внизу AR-изображение. На изображении, полученном по исходным эхосигналам можно выделить только один блик, изображение точечных рассеивателей с координатами (3.0, 3.0), (2.5, 2.5), (1.5, 1.5) и (0.0, 0.0) сливаются в один блик. На ММЭ-изображении уверенно разрешаются даже предельно близко расположенные импульсы. На AR-изображении разрешающая способность изображения возросла, но не настолько, чтобы разрешить все пять бликов.

Рис. 2

Рис. 3

## Реальные эхосигналы в СО-2 для ПЭП с углом ввода 70 градусов и центральной частотой 2.5 МГц

Для модельных экспериментов были выбраны эхосигналы, отраженные от отверстия диаметром 6 мм в стандартном образце СО-2, которые использовались для калибровки преобразователя с резонансной частотой 2.5 МГц и углом ввода 70 градусов. Временная апертура состояла из 1000 отсчетов с интервалом 0.025 мкс. Измерения проводились системой «Авгур».

Рис. 4

На Рис. 4 вверху приведен исходный эхосигнал (точечная линия) и эхосигнал после обработки ММЭ (сплошная линия). Для расчета энтропии использовался модуль вектора  $f$ , согласно формуле (3). Было выполнено 100 итераций, параметр  $\gamma = 0.5$ ,  $\mu = 10^{-5}$ . Разрешающая способность возросла примерно в три раза, а амплитуда перерассеянных эхосигналов существенно уменьшилась, видно, что импульс обегания находится в противофазе к импульсу отраженному от отверстия.

На Рис. 4 внизу приведен исходный эхосигнал (точечная линия) и после построения AR-модели спектра эхосигналов (сплошная линия) со следующими параметрами экстраполяции:  $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\min} = 1.8$  МГц;  $f_{\max} = 3.2$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 15.0$  МГц; оценка коэффициентов по методу Юла-Уокера; порядок модели 40. Сигналы перед построением AR-модели были инверсно профильтрованы. Результат сопоставим с полученным ММЭ, но ММЭ более точно передал соотношение амплитуд прямого отражения и импульса обегания, а AR-эхосигналы имеют несколько лучшее разрешение.

## Сжатие сложных сигналов с помощью ММЭ

Решение задачи обращения свертки методом максимальной энтропии может быть оказаться полезным и для случая сжатия сложных сигналов  $s(t)$  [45, 46]. Преобразователь с углом ввода в сталь 60 градусов и центральной частотой 2.5 МГц, работающий в совмещенном режиме, перемещался по поверхности образца СО-3. Для проведения измерений использовался сложный фазоманипулированный по коду Баркера длиной 13 периодов сигнал, отраженный от поверхности стандартного образца СО-3. Частота дискретизации эхосигналов была равна 20 МГц.

На Рис. 5 сверху представлены исходные эхосигналы  $s(x, t)$ , а на рисунке внизу после обработки их ММЭ. Для расчета энтропии использовался модуль вектора  $f$ , согласно формуле (3). При обработке было выполнено 100 итераций,  $\gamma = 0.4$ ,  $\mu = 10^{-5}$ . Эталонный эхосигнал был извлечен из того же набора эхосигналов при положении преобразователя в точке  $x = 0.0$  мм. Для подчеркивания малых амплитуд контрастность изображения всех эхосигналов в данном разделе увеличена на 9 дБ.

Рис. 5

На Рис. 6 (сверху) представлены AR-эхосигналы с параметрами экстраполяции ( $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 7.0$  МГц; оценка коэффициентов по методу Юла-Уокера; порядок модели 15). Сигналы были предварительно инверсно профильтрованы в диапазоне  $f_{\min} = 2.0$  МГц,  $f_{\max} = 3.4$  МГц. На рисунке снизу приведены AR-эхосигналы с теми же параметрами обработки, но с оценкой коэффициентов AR-модели по методу Берга [15].

Рис. 6

Сжатие эхосигналов методом максимальной энтропии дает лучший результат – эхосигналы после обработки получились со сверхразрешением, время задержки импульсов всегда определялось правильно и на бóльшей апертуре по оси  $x$ . Сжатие сложных сигналов с построением AR-модели их спектра, дает худший результат, выражающийся в том, что из-за принципиальных ограничений метода возникают паразитные задержки сигналов, ко-

Рис. 7

торые особенно заметны при оценке коэффициентов AR-модели методом Берга. Сжатие сложных сигналов с помощью инверсной фильтрации (Рис. 7) не позволяет достичь сверхразрешения.

## Модель «висячей» трещины высотой 3.0 мм (продольные волны)

Для модельных экспериментов были выбраны эхосигналы, отраженные от модели «висячей» трещины высотой 3.0 мм в стальном образце (Рис. 8), измеренные на продольной волне преобразователем типа LS5D70TF с резонансной частотой 5.0 МГц и углом ввода 70 градусов. Временная апертура состояла из 512 отсчетов с интервалом 0.025 мкс.

Ось  $x$  направлена слева направо, и ее начало совпадает с проекцией трещины на поверхность образца. На Рис. 9 слева приведен один исходный эхосигнал в точке  $x = -52.4$  мм и ре-

Рис. 8

зультат построения AR-модели спектра эхосигналов с параметрами экстраполяции ( $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 10.0$  МГц; оценка коэффициентов по Бергу; порядок модели 60).

Рис. 9

После экстраполяции разрешение сигналов возросло примерно в четыре раза, и отчетливо стало видно, что эхосигналы, отраженные от верхнего и нижнего края модели «висячей» трещины разнополярны, что является констатацией классического факта [47].

Справа тот же эхосигнал, но обработанный ММЭ. Для расчета энтропии использовался модуль вектора  $f$ , согласно формуле (3). При обработке, было выполнено 50 итераций,  $\gamma = 0.4$ ,  $\mu = 10^{-20}$ . Разрешающая способность возросла примерно в два раза. На нижнем рисунке результат применения ММЭ, но для расчета энтропии использовался квадрат вектора  $f$ , согласно формуле (4).

На Рис. 10 (верхняя панель) приведено изображение, восстановленное по измеренным эхосигналам, а на нижней панели рисунке построения AR-модели спектра эхосигналов. После экстраполяции лучевое разрешение возросло примерно в четыре раза, и отчетливо стали видны блики, соответствующие верхнему и нижнему краю модели висячей трещины. Расстояние между максимальными значениями бликов, как для первого, так и для второго, изображения, равно примерно 3.8 мм, что дает завышенную оценку высоты тре-

Рис. 10

щины. Отметим, что фронтальное разрешение несколько ухудшилось, а блики приобрели вид «ласточкиного хвоста». Это следствие того, что при оценке коэффициентов AR-модели использовался алгоритм Берга, в результате чего получается устойчивая модель спектра сигнала, но после экстраполяции эхосигналы чуть задерживаются или опережают свое истинное положение. Кроме того, после применения алгоритма Берга некоторые импульсы могут раздваиваться [15]. В результате ухудшается как фронтальная разрешающая способность изображения, так и лучевая разрешающая способность.

На Рис. 11 (верхняя панель) приведено ММЭ-изображение при расчете энтропии модуля оценки изображения. При обработке, было выполнено 50 итераций,  $\gamma = 0.4$ ,  $\mu = 10^{-20}$ . Для изображения ММЭ лучевая разрешающая способность возросла примерно в два раза, а вот фронтальная не изменилась. Расстояние между максимальными значениями бликов равно примерно 3.0 мм. При расчете энтропии квадрата оценки изображения ММЭ-изображение имеет более высокое лучевое и фронтальное разрешение, которое привело к тому, что стала заметна сложная структура бликов. Возможно эти блики есть следствие влияния на распространение ультразвукового пучка границ образца, в котором проводились измерения. При обработке, было выполнено 100 итераций,  $\gamma = 0.5$ ,  $\mu = 10^{-3}$ .

Рис. 11

## Модель «висячей» трещины высотой 3.0 мм (поперечные волны)

Анализируются эхосигналы, отраженные от той же модели трещины что и в предыдущем разделе, измеренные на поперечной волне преобразователем типа **LS5D70TF** с резонансной частотой 4.0 МГц и углом ввода 70 градусов. Временная апертура состояла из 1005 отсчетов с интервалом 0.025 мкс.

На Рис. 12 вверху приведено изображение, восстановленное по измеренным эхосигналам, а внизу после построения AR-модели спектра эхосигналов. На обычном изображении слабо виден блик от вершины, самый яркий блик сформирован несколькими эхосигналами, один из которых – блик соответствующий нижнему краю трещины. Расстояние между максимальными значениями бликов равно 2.7 мм. После экстраполяции лучевое разрешение возросло примерно в четыре раза, и отчетливо стали видны блики, соответствующие верхнему и нижнему краю модели висячей трещины. Отметим, что фронтальное разрешение несколько ухудшилось. Высоту трещины можно оценить как 2.0 мм.

Рис. 12

При обработке измеренных эхосигналов ММЭ при расчете энтропии модуля оценки изображения, было выполнено 50 итераций,  $\gamma = 0.4$ .

Лучевая разрешающая способность возросла примерно в два раза (вверху на Рис. 13), а вот фронтальная практически не изменилась. Высоту трещины можно оценить как 2.5 мм. В целом картина получилась заметно сложнее, в сравнении с изображением, полученным на продольных волнах. На Рис. 13 внизу представлено изображение при расчете энтропии квадрата оценки изображения. Было выполнено 50 итераций,  $\gamma = 0.2$ . Как эталонный сигнал, так и обрабатываемые сигналы были пропущены через полосовой фильтр в диапазоне частот от 1.5 до 6.5 МГц. Разрешающая способность по сравнению с исходными эхосигналами возросла примерно в четыре раза. Расстояние между максимальными значе-

Рис. 13

ниями бликов равно примерно 2.5 мм. Непонятной осталась причина раздвоения блика от нижней границы трещины!

## «Ступенька» в алюминиевом образце

В данном разделе приведены результаты измерения эхосигналов от «ступеньки» высотой 1.0 мм в образце из алюминия (Рис. 14) преобразователем типа **s5h55** с рабочей частотой 5.0 МГц. Преобразователь имеет угол ввода в сталь 55 градусов и половину угла раскрыва 10 градусов для дюралюминия. Отметим тот факт, что эталонный эхосигнал измерялся в стальном образце СО-3, а измерения проводились в дюралюминиевом, что априори приводит к различиям в форме излученных сигналов. Для сравнения изображений полученных на разных частотах использовались эхосигналы, полученные преобразователем типа **U60** с рабочей частотой 2.5 МГц, углом ввода в сталь 40 градусов и половиной угла раскрыва 20 градусов для дюралюминия.

Рис. 14

На все рисунки данного раздела наложена маска «ступеньки». На Рис. 15 слева представлено изображение, полученное с использованием преобразователя **U60**, а справа с использованием преобразователя **s5h55**. Изображение «ступеньки», полученное с использованием преобразователя **U60**, представлено двумя бликами, смещенными друг относительно друга по высоте из-за спеклового шума и не разрешающимися по уровню 0.7. Использование преобразователя **s5h55** из-за длинного импульса также дает невыразительное изображение. Однако, излучения на удвоенной частоте привело к тому, что изображение «ступеньки» стало более похоже на уголкового отражателя – амплитуда блика от основания «ступеньки» примерно в десять раз больше блика от вершины. Но при этом, блик находится не сбоку (Рис. 15 слева), а над бликом основания, что позволило точнее определить высоту и геометрию «ступеньки».

Рис. 15

На Рис. 16 слева представлено AR-изображение, полученное преобразователем **U60** с параметрами экстраполяции ( $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 9.5$  МГц; оценка коэффициентов по методу Юла-Уокера; порядок модели 50). Сигналы были инверсно профильтрованы в диа-

Рис. 16

пазоне  $f_{\min} = 1.8$  МГц,  $f_{\max} = 3.5$  МГц. На рисунке справа показано AR-изображение полученное преобразователем **s5h55** с параметрами экстраполяции ( $f_{\min}^{extr} = 0.1$  МГц;  $f_{\max}^{extr} = 9.5$  МГц; оценка коэффициентов по методу Юла-Уокера; порядок модели 50). Сигналы были инверсно профильтрованы в диапазоне  $f_{\min} = 3.0$  МГц,  $f_{\max} = 5.8$  МГц.

На Рис. 17 слева представлено изображение «ступеньки», полученное по эхосигналам (преобразователь **U60**) после обработки их ММЭ в случае использования модуля вектора  $f$  при расчете энтропии (3). При обработке  $\gamma = 0.8$ ,  $\mu = 10^{-3}$ , было выполнено 50 итераций. Перед применением ММЭ сигналы были полосовым образом профильтрованы в диапазоне ( $f_{\min}=1.0$ ;  $f_{\max}=5.0$ ) МГц. Справа представлено изображение «ступеньки», полученное по эхосигналам (преобразователь **s5h55**) после обработки их ММЭ в случае использования модуля вектора  $f$  при расчете энтропии (3). Перед применением ММЭ сигналы были полосовым образом профильтрованы в диапазоне  $f_{\min} = 3.0$  МГц,  $f_{\max} = 5.8$  МГц. Выполнено 50 итераций,  $\gamma = 0.4$ ,  $\mu = 10^{-20}$ . На изображении, полученном ММЭ, лучевая разрешающая способность увеличилась примерно в три раза, так что стали хорошо видны блики вершины и основания «ступеньки», высоту которой можно оценить довольно точно как 1.0 мм. Стала видна серия бликов сформированных возбужденной поверхностной волной на грани «ступеньки», так называемые ложные сигналы [48]. Фронтальное разрешение заметно лучше, чем у AR-изображений.

Рис. 17

## Выводы

Метод повышения разрешения эхосигналов на основе деконволюции с регуляризацией методом максимальной энтропии продемонстрировал свою эффективность. Можно сделать следующие выводы.

- В сравнении с построением AR-модели спектра сигнала, ММЭ в случае использования модуля вектора  $f$  при расчете энтропии (3) не дает многократного повышения лучевого разрешения при обработке реальных эхосигналов, но зато дает лучшее фронтальное и лучевое разрешение при когерентной обработке за счет более стабильного восстановления времени задержки импульса. В случае использования квадрата вектора  $f$  при расчете энтропии (4), лучевое разрешение больше.
- Не полностью понятен способ управления степенью повышения разрешающей способности. Можно заметить, что из семейства регуляризирующих функционалов [39] использование квадрата оценки для расчета энтропии дает более высокое разрешение, чем использование модуля. Кроме того, вид функции  $s_e(t)$  и, следовательно, матрицы  $G$  также заметно влияет как на скорость сходимости, так и на степень повышения разрешающей способности эхосигналов.
- В качестве начальной точки  $f_0$  алгоритма оптимизации предпочтительнее использовать нулевую оценку.
- Нет четкого ответа на вопрос, какое значение  $\gamma$  надо выбирать при обработке эхосигналов, но ММЭ-изображения в данной статье были получены в основном при  $\gamma = 0.4..0.5$ .
- Нет однозначного ответа на вопрос о корректном выборе значения фоновой интенсивности. В работе [33] отмечено, что задание этого параметра с варьированием точности в несколько порядков не приводит к заметным искажениям в получаемом решении. Данное утверждение подтвердилось при расчетах. Вариантом для выбора  $\mu$  может служить

оценка на основе максимальной амплитуды обрабатываемого сигнала, например,

$\mu = A_{\max} 10^{-10}$  в случае использования модуля вектора  $f$  при расчете энтропии (3), и

$\mu = A_{\max} 10^{-5}$  для случая использования квадрата вектора  $f$  при расчете энтропии (4).

- Важное отличие ММЭ от построения AR-модели спектра сигнала в меньшем количестве настраиваемых параметров. При построении AR-модели спектра сигнала надо задать, во-первых, исходный интервал частот  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$ , во-вторых, интервал частот для экстраполяции  $f_{\min}^{extr}$  и  $f_{\max}^{extr}$ , в-третьих, выбрать порядок AR-модели, и, наконец, выбрать метод оценки коэффициентов AR-модели. Причем неточность выбора  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  может довольно сильно повлиять на результат экстраполяции и привести к нежелательным искажениям изображения и появлению артефактов. Для метода максимальной энтропии надо задать два параметра  $\mu$  и  $\gamma(\mu)$ , выбор оптимальных значений которых рассмотрен выше.

В целом можно сделать вывод, что применение метода максимальной энтропии для деконволюции эхосигналов в дефектоскопии позволяет повысить качество изображений дефектов восстановленных когерентными методами. Интересные результаты получаются при сжатии сложных сигналов методом максимальной энтропии.

Базулин Андрей Евгеньевич

Россия, Москва, 123612, Пятницкое шоссе, д. 37, кв. 476, тел. 196-91-91 (р), 752-31-47 (д)

Базулин Евгений Геннадиевич

Россия, Москва, 123612, Пятницкое шоссе, д. 37, кв. 476, тел. 196-90-16 (р), 752-31-47 (д)

20 апреля 2006 года.

## Рисунки

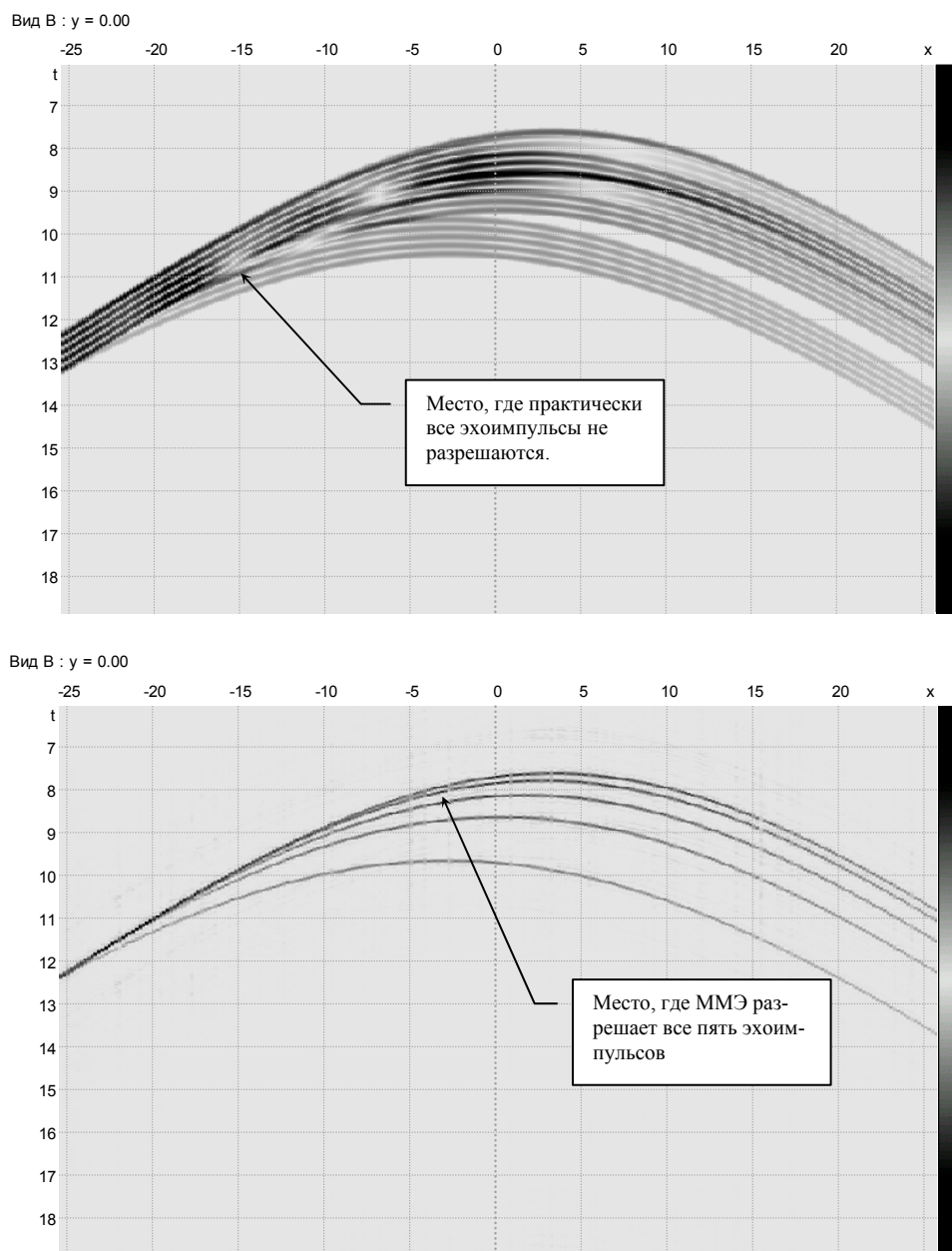
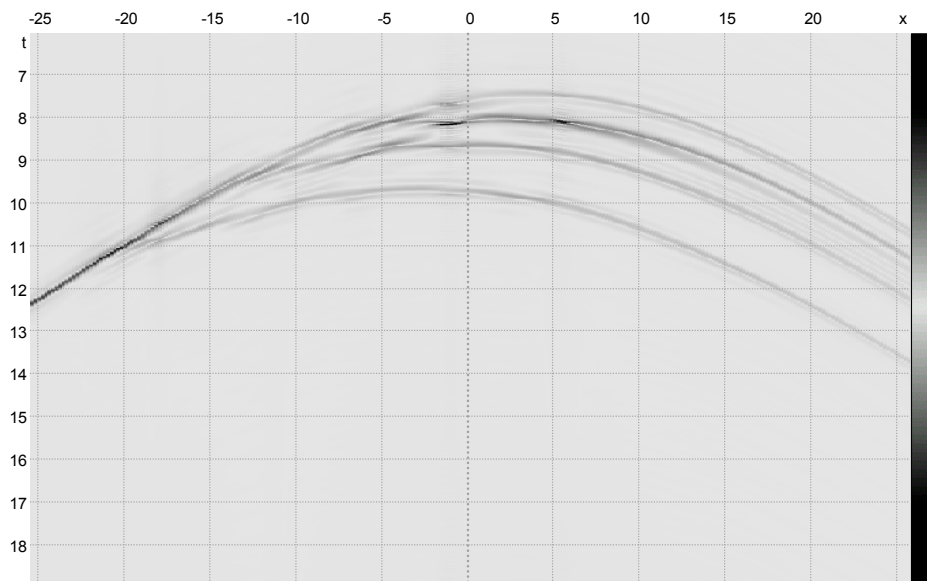
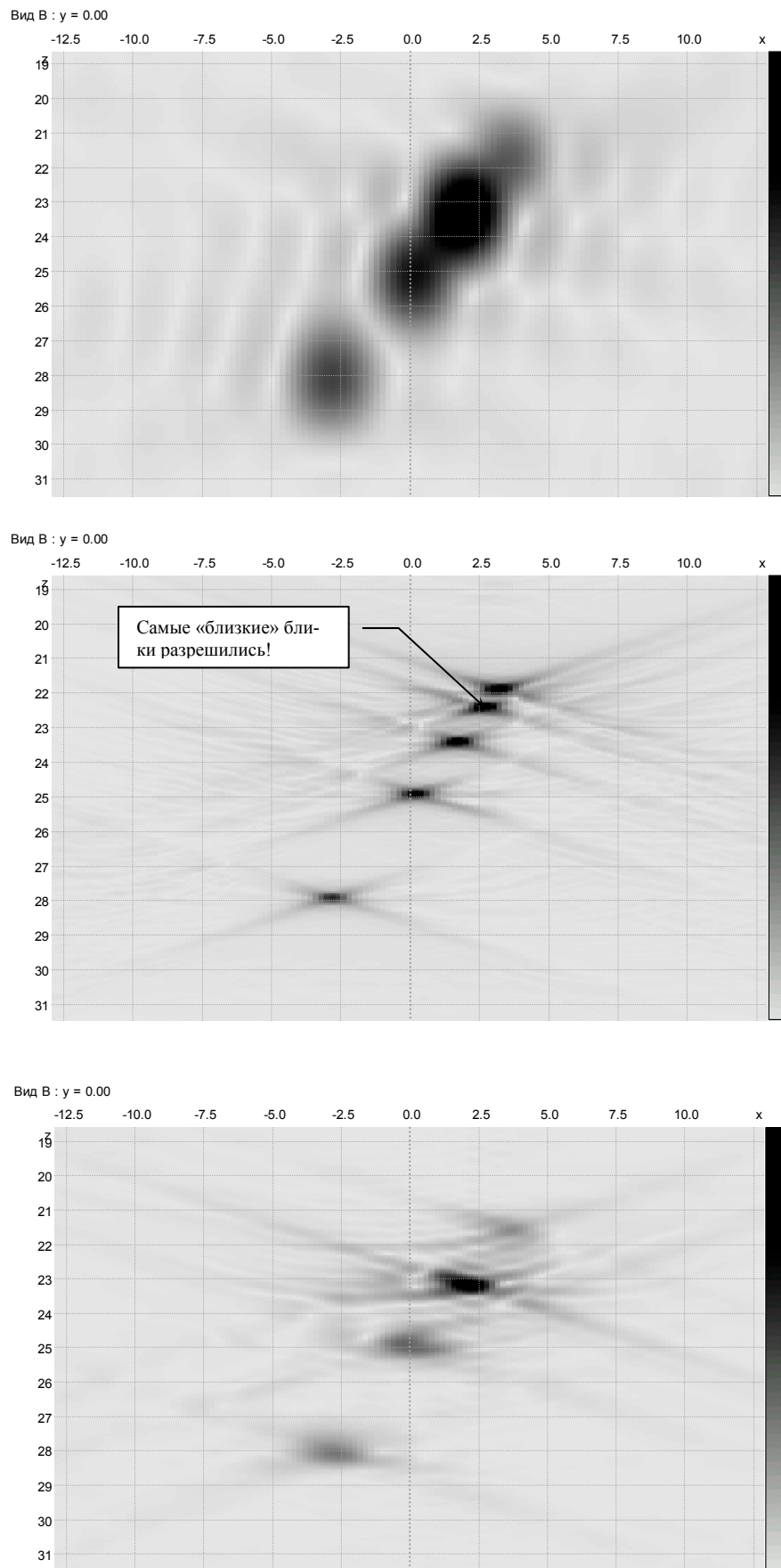


Рис. 1

Вид В :  $y = 0.00$



**Рис. 2**



**Рис. 3**

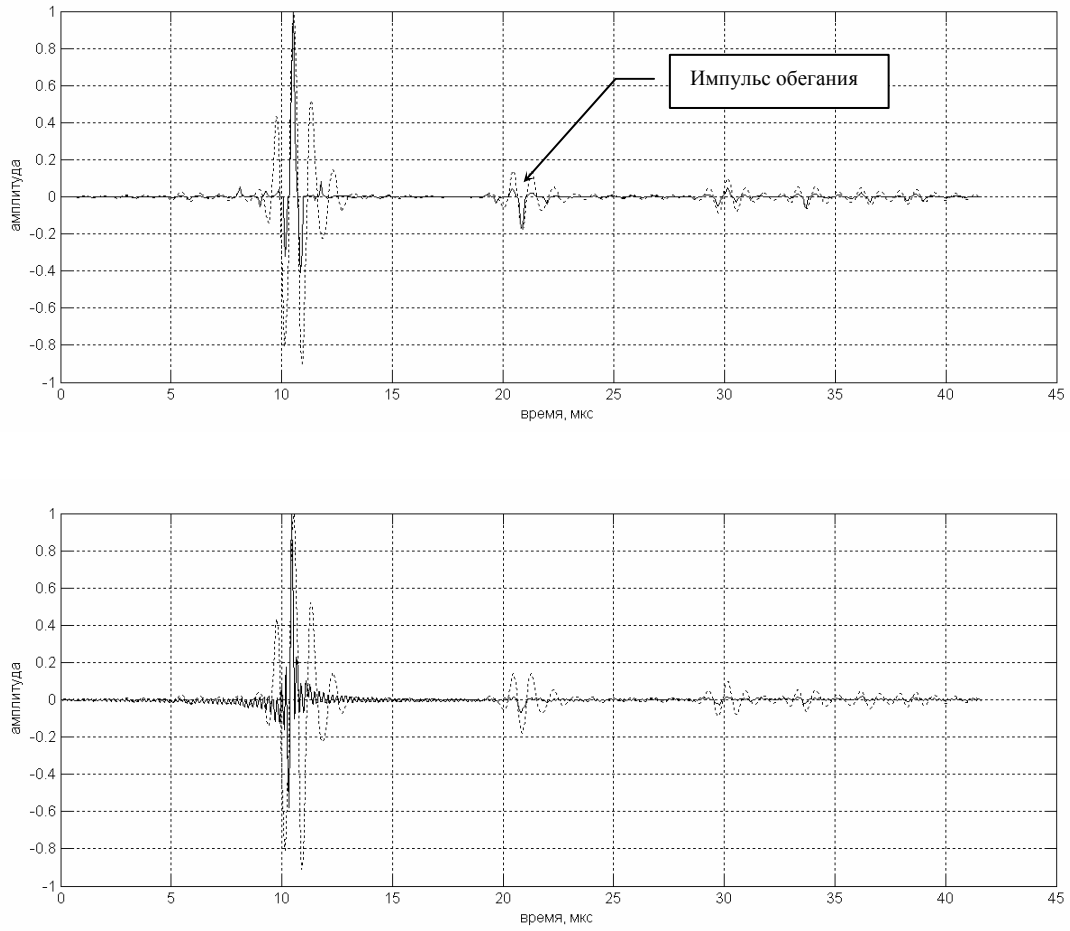
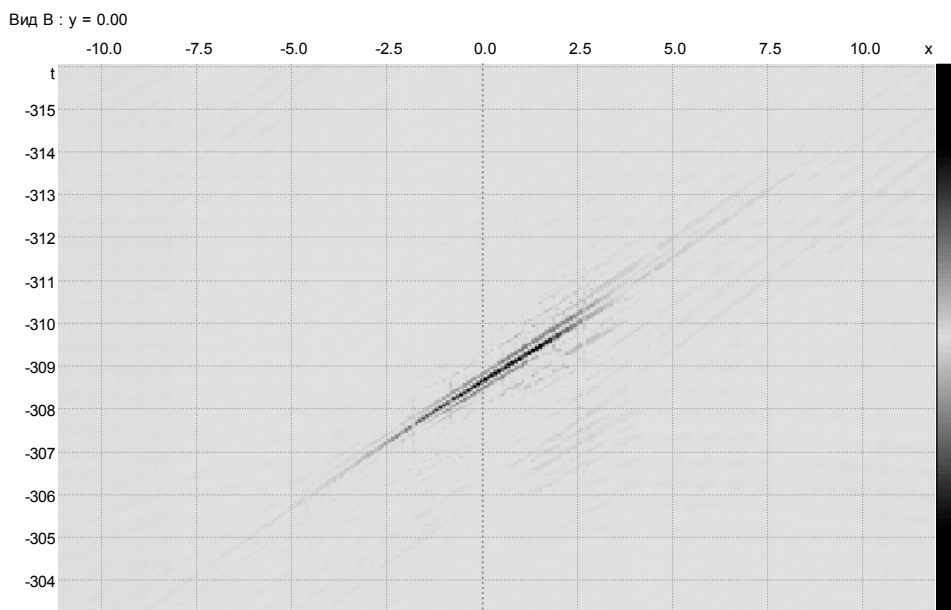
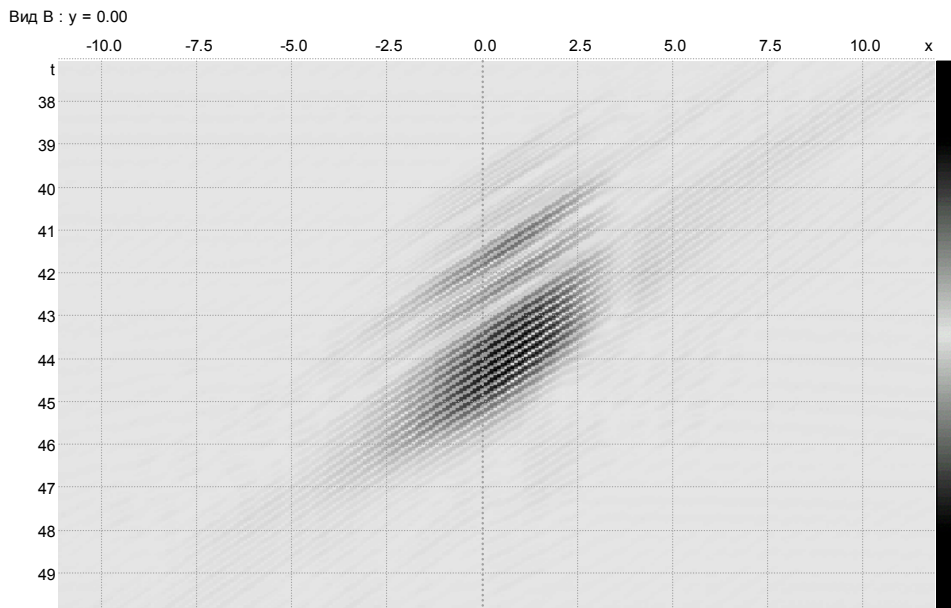
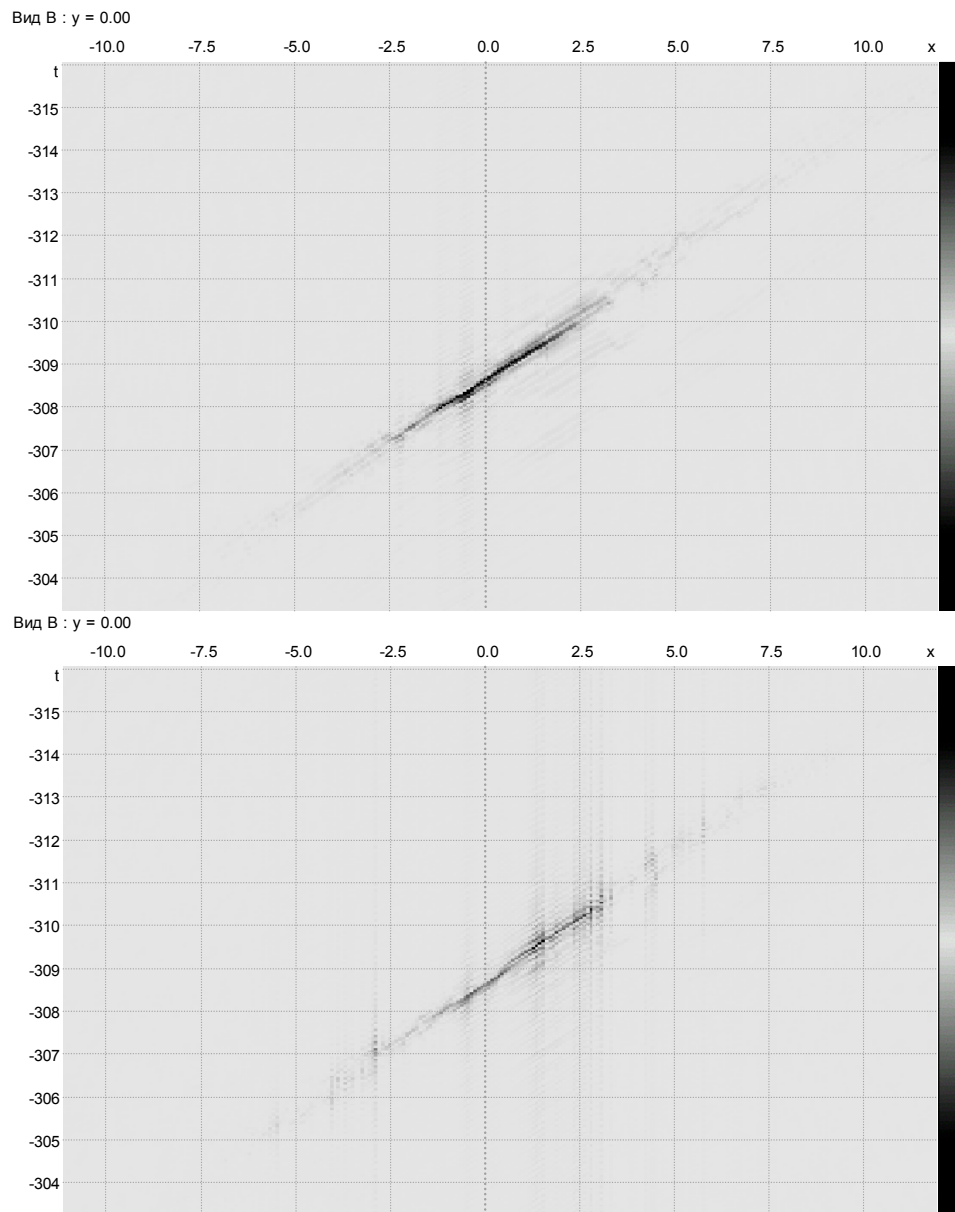


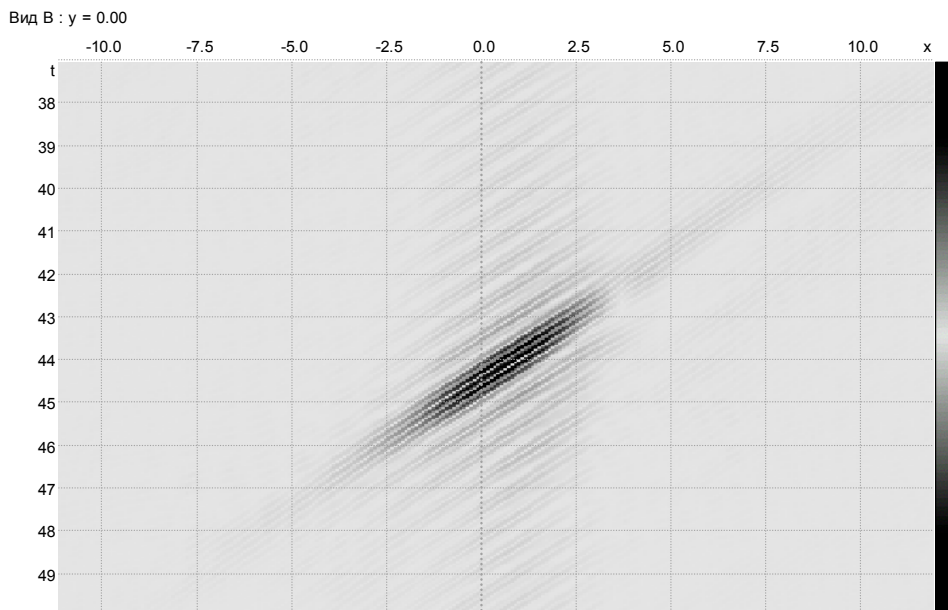
Рис. 4



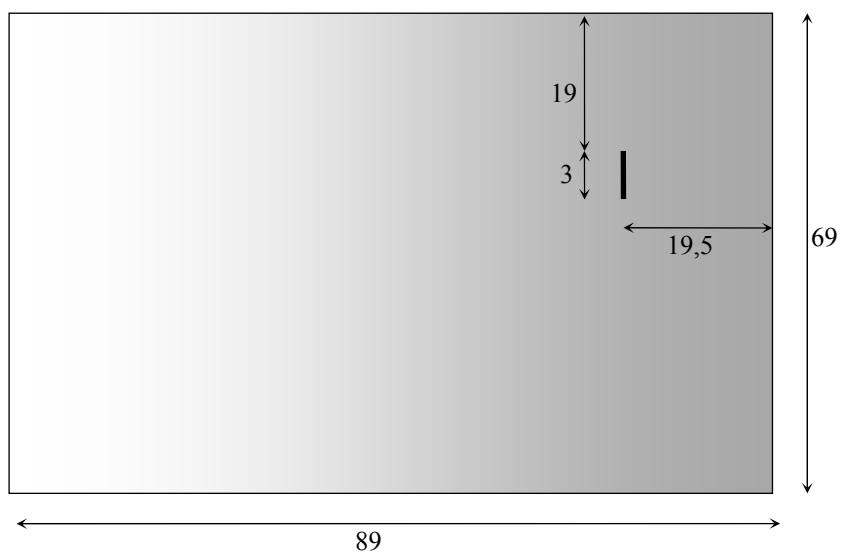
**Рис. 5**



**Рис. 6**



**Рис. 7**



**Рис. 8**

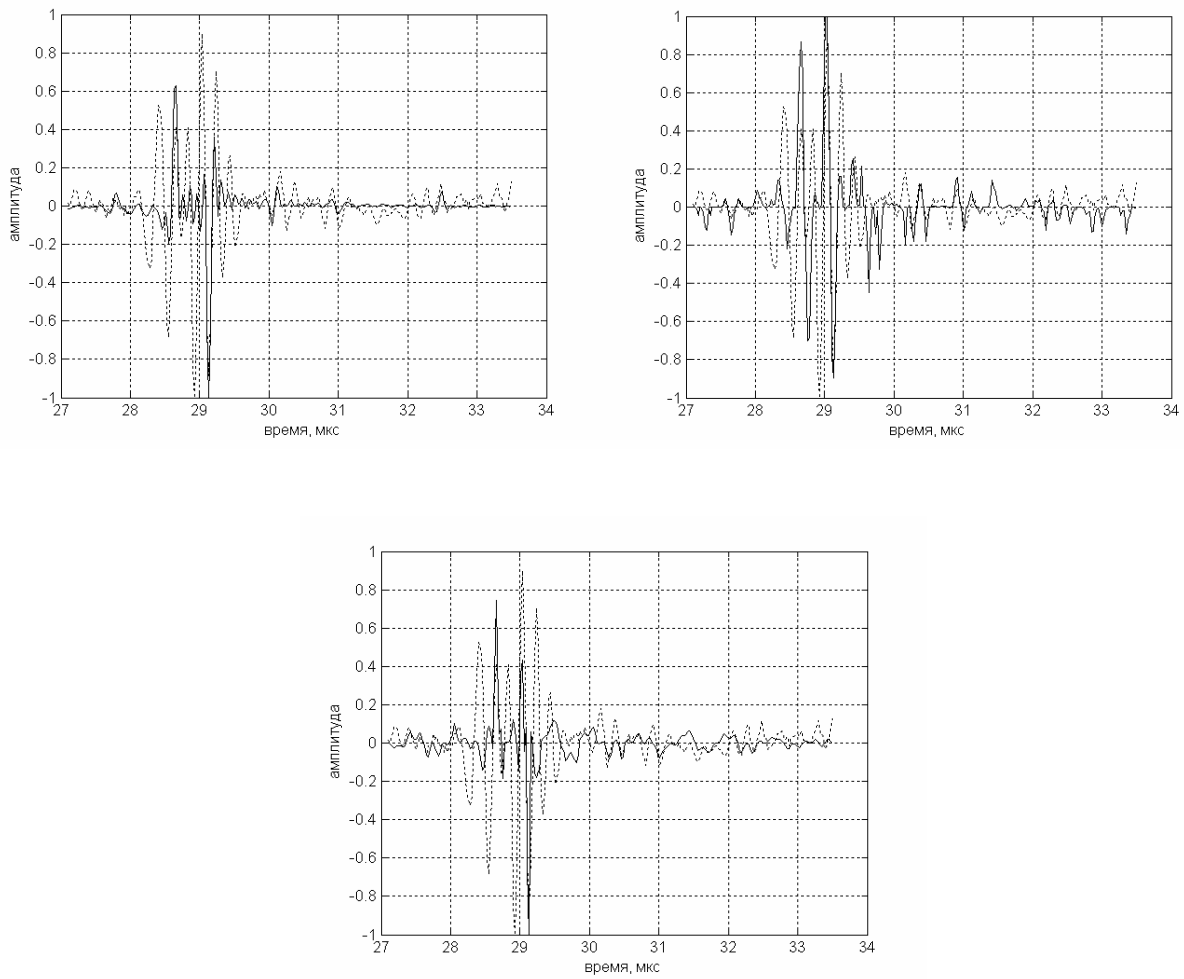


Рис. 9

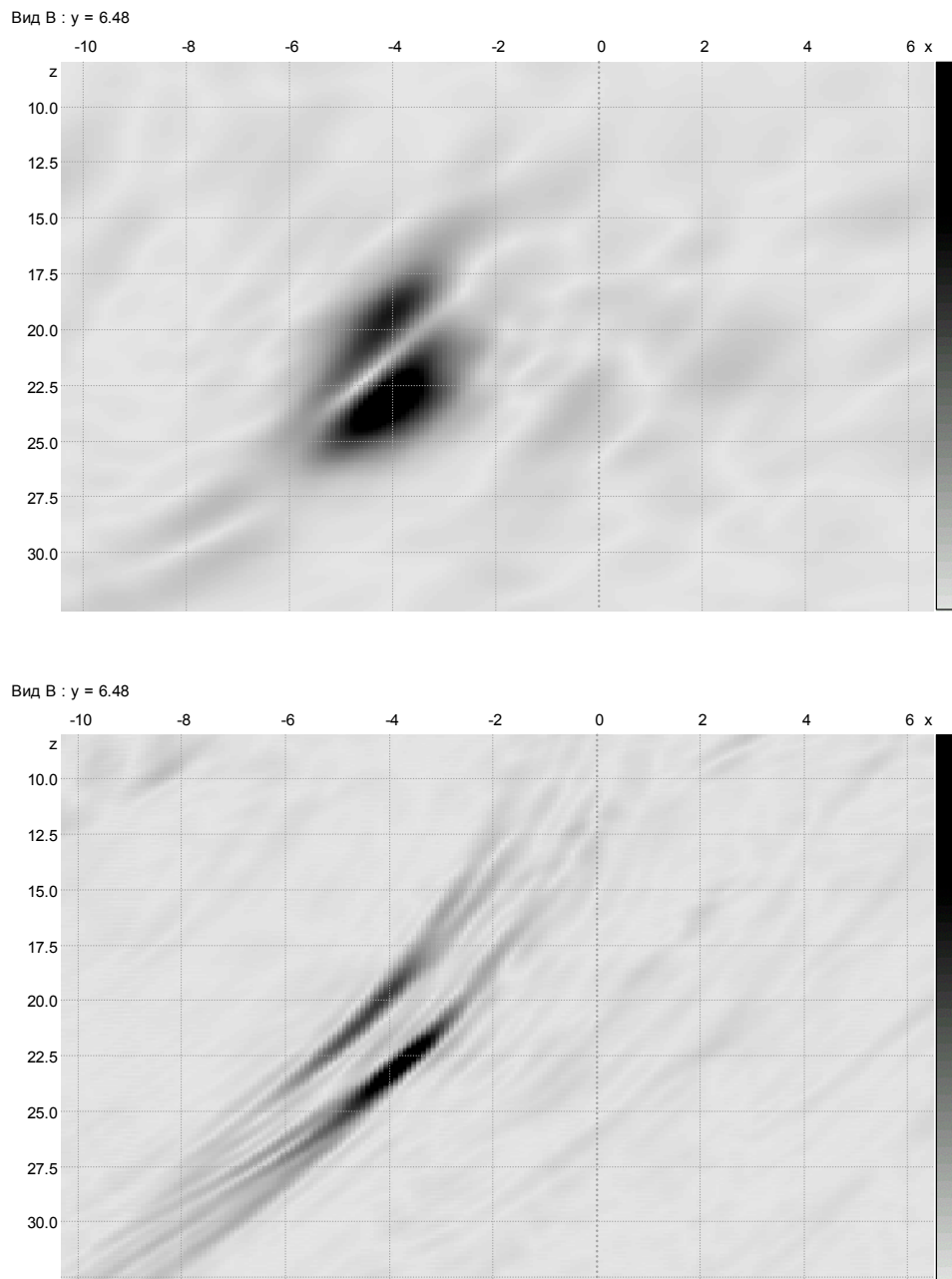


Рис. 10

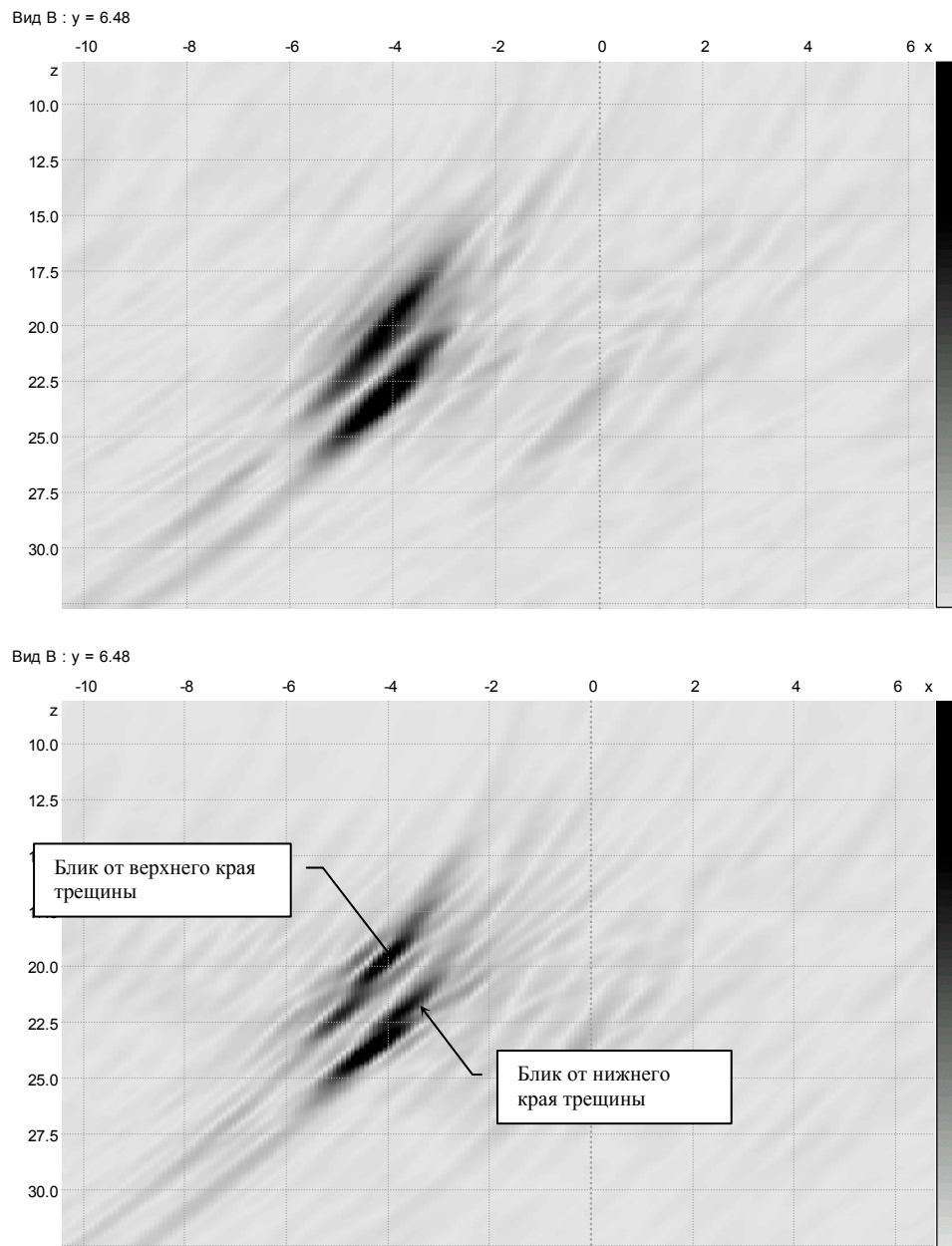


Рис. 11

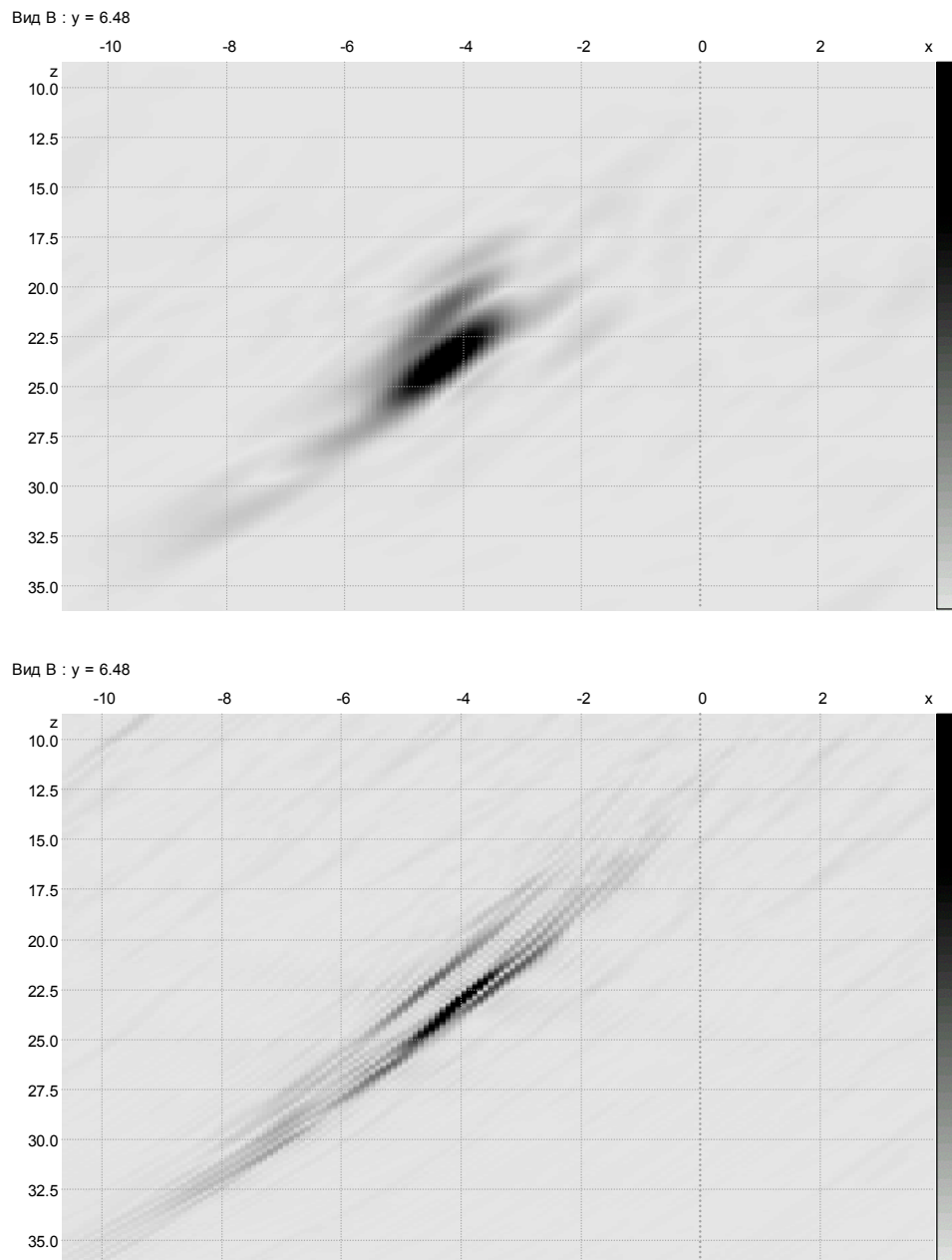


Рис. 12

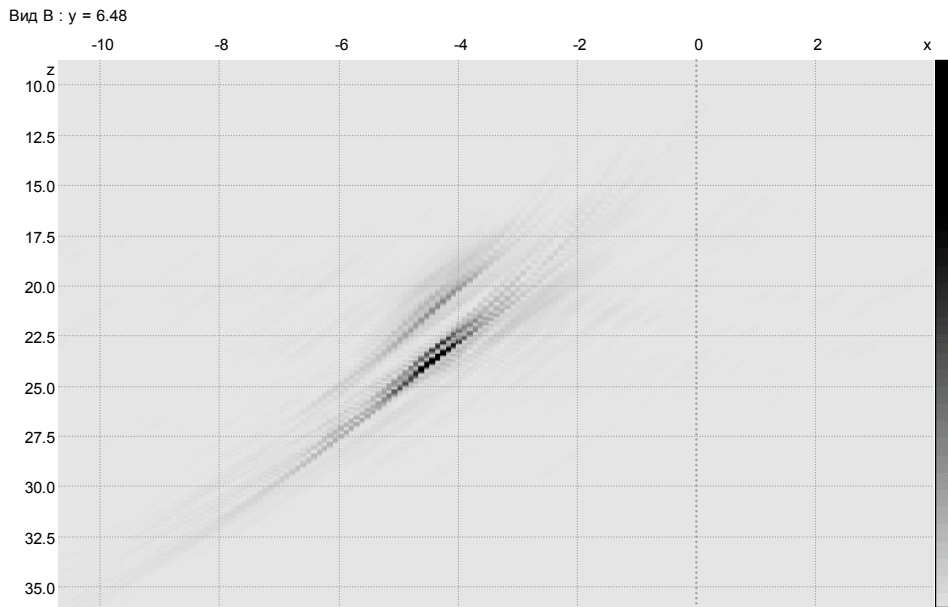
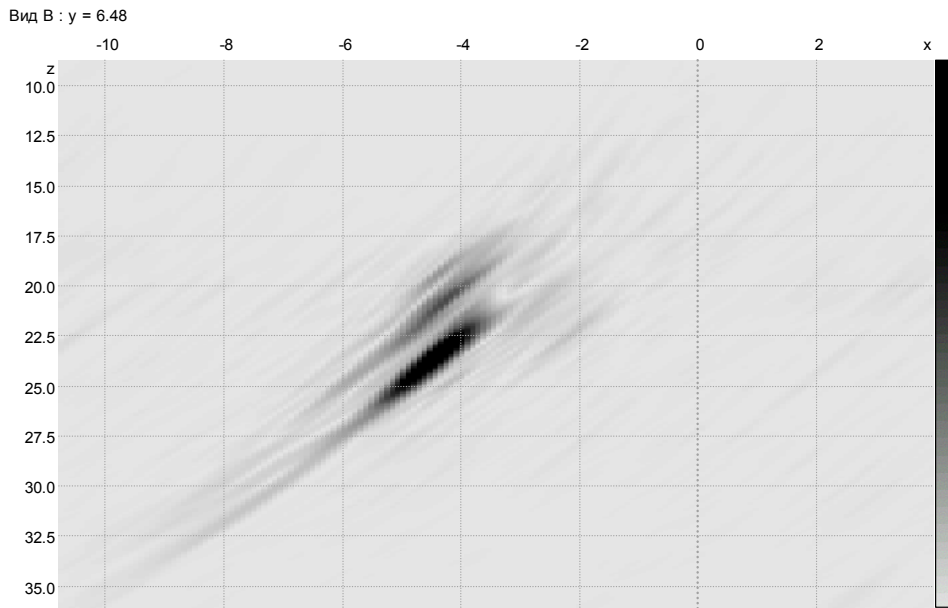
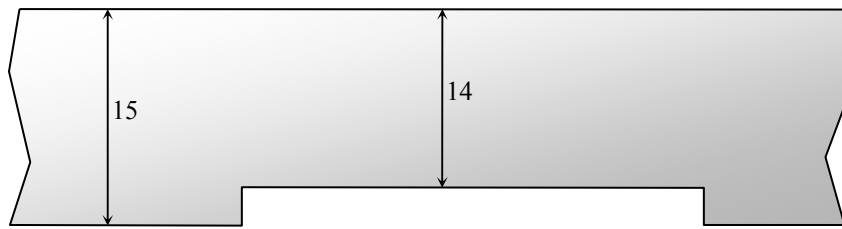
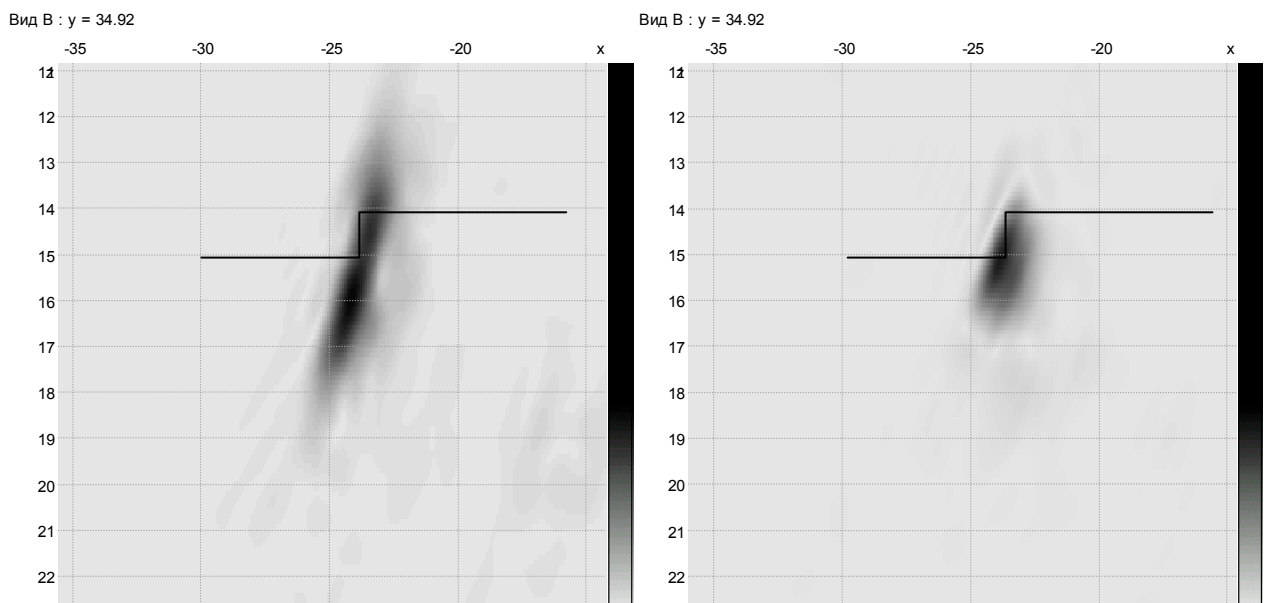


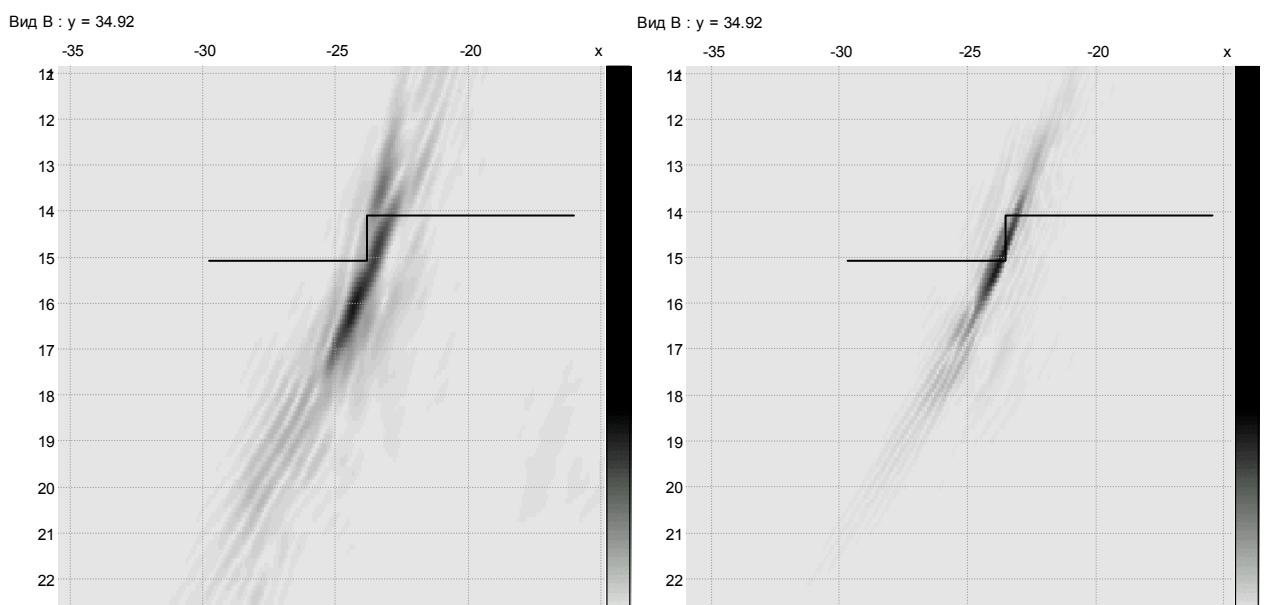
Рис. 13



**Рис. 14**



**Рис. 15**



**Рис. 16**

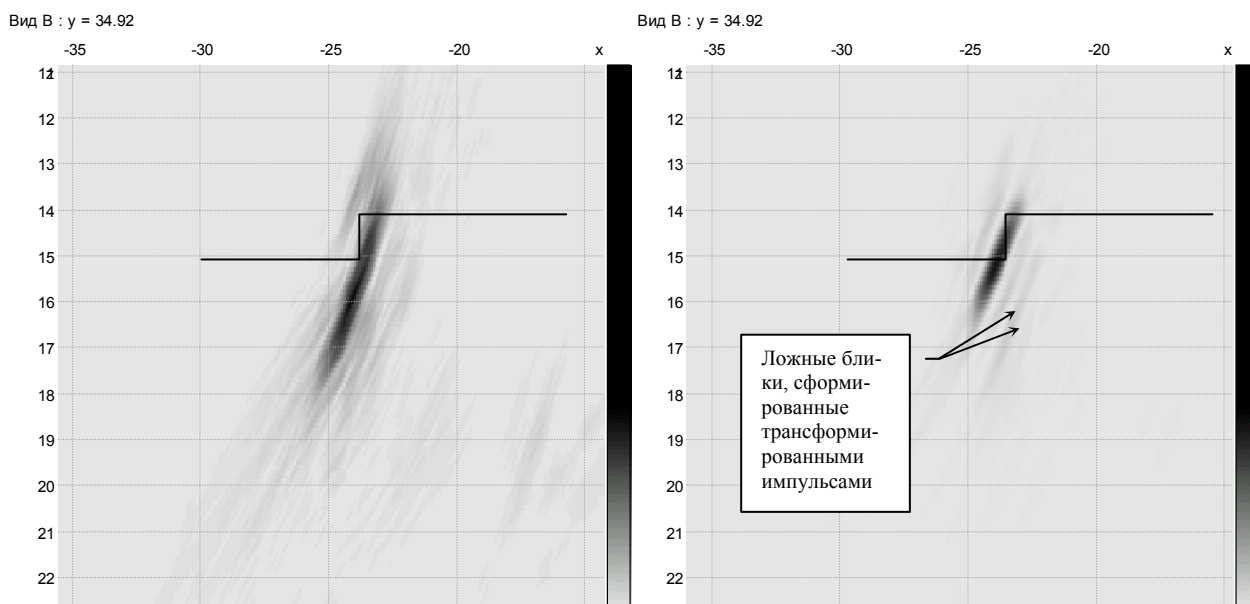


Рис. 17

## Подрисуночные надписи

Рис. 1 Модельные эхосигналы от пяти точечных отражателей (вверху) и ММЭ-эхосигналы (внизу).

Рис. 2 AR-эхосигналы от пяти точечных отражателей.

Рис. 3 Изображения, восстановленные методом ПСП. Сверху по исходным эхосигналам, в середине по ММЭ-эхосигналам, внизу по AR-эхосигналам.

Рис. 4 Эхосигналы от отверстия диаметром 6 мм в СО-2 (вверху – исходные и после проведения обработки ММЭ, внизу – исходные и после построения AR-модели спектра). Исходные сигналы изображены точечной линией, а после обработки сплошной.

Рис. 5 Исходные сложные сигналы (сверху) и результат их сжатия ММЭ (снизу).

Рис. 6 Результат сжатия сложных эхосигналов с построением AR-модели их спектра. Сверху с вычислением коэффициентов модели методом Юла-Уокера, снизу методом Берга.

Рис. 7 Сжатие сложных эхосигналов с помощью инверсной фильтрации.

Рис. 8 Эскиз образца с моделью «висячей» трещины.

Рис. 9 Эхосигнал от модели висячей трещины при нахождении преобразователя в точке  $x = -52.4$  мм. Вверху слева исходный эхосигнал (изображен точками) и AR-эхосигнал (сплошная линия), вверху справа исходный эхосигнал (изображен точками) и ММЭ-эхосигнал (сплошная линия) при расчете энтропии модуля оценки изображения. Внизу исходный эхосигнал (изображен точками) и ММЭ-эхосигнал (сплошная линия) при расчете энтропии квадрата оценки изображения.

Рис. 10 Изображения, восстановленные методом ПСП. Вверху по исходным эхосигналам, снизу по AR-эхосигналам.

Рис. 11 Изображения, восстановленные методом ПСП. Вверху по эхосигналам, обработанным ММЭ, внизу ММЭ-изображение при расчете энтропии квадрата оценки изображения.

Рис. 12 Изображения, восстановленные методом ПСП. Вверху по исходным эхосигналам, внизу по AR-эхосигналам.

Рис. 13 Изображения, восстановленные методом ПСП. Вверху по эхосигналам, обработанным ММЭ, внизу ММЭ-изображение при расчете энтропии квадрата оценки изображения.

Рис. 14 Эскиз образца из алюминия со ступенькой высотой 1.0 мм.

Рис. 15 Изображение «ступеньки» в образце из алюминия полученное преобразователем U60 (слева) и s5h55 (справа).

Рис. 16 AR-изображение «ступеньки» в образце из алюминия полученное преобразователем **U60** (слева) и **s5h55** (справа).

Рис. 17 ММЭ-изображение «ступеньки» в образце из алюминия полученное преобразователем **U60** (слева) и **s5h55** (справа).

## Список литературы

---

- 1 Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем автоматизированного УЗК с когерентной обработкой данных. – В мире неразрушающего контроля, 2004, №4, с. 22-27.
- 2 Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Гребенников В.В., Гребенников Д.В., Тихонов Д.С. (НПЦ ЭХО+, Москва) Опыт применения ультразвуковых компьютерных систем с когерентной обработкой данных серии «Авгур» в атомной энергетике. - Тезисы докладов 15 Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», Москва, 28 июня - 2 июля 1999 г.
- 3 Горюнов А.А., Сасковец А.В. Обратные задачи рассеяния в акустике. - М.: Издательство МГУ, 1989. - 152 с.
- 4 Hall T.E., Doctor S.R., Reid L.D., Littfield R.J., Gilber R.W. Implementation of real-time ultrasonic SAFT system for inspection of nuclear reactor components. - Acoustical Imaging, 1987, vol. 15, p. 253-266.
- 5 Erhard A., Lucht B., Schulz E., Montag H.-J., Wüstenberg H., Beine U. Characterization of Defects in Austenitic Pipe Gird Welds. - The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, ISSN: 1435-4934, vol. 5, № 9, October 2000.
- 6 Осетров А.В. Теория пространственно-временной дифракционной томографии при сканировании одиночного приемно-излучателя по плоскости. – Акустический журнал, 1991, т. XXXVII, № 3, с. 528-534.
- 7 Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г, Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция. - Дефектоскопия, 1990, № 2, с. 29-41.
- 8 Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J., Kreutter T. Three-dimensional imaging system based on Fourier transformation synthetic aperture focusing technique. - Ultrasonics, 1990, № 28, p. 241-255.
- 9 Takahashi F., Nagashima Y., Tanaka I., Igeta M., Nakada S. Ultrasonic Sizing and Recognition of Cracks and Porosities in Weld Metals Using Acoustical Holographic Inspections. - First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 20-22 October 1998, Amsterdam, Netherlands.
- 10 Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Цифровое восстановление изображения рассеивателей методом проекции в спектральном пространстве. - Акустический журнал, 1988, XXXIV, № 2, с. 222-231.

- 11 Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х., Вощанов А.К., Ермолов И.Н., Гурвич А.К. Методы акустического контроля металлов/под ред. Алешина Н.П. - М.: Машиностроение. 1989. - 456 с.
- 12 Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971. - 428 с.
- 13 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. - 280 с.
- 14 Box G.E., Jenkins G.M. Time serial analysis. Forecasting and control. - San-Francisco. Holden-dey. 1970.
- 15 Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ: пер. с англ. - М.: Мир, 1990. 584 с.
- 16 Abdel-Aal R.E., Macleod C.J., Durrani T.S. Expansion of acoustic hologram aperture using ARMA modeling techniques. - Acoustical Imaging, 1982, vol. 12, p. 679-707.
- 17 Takuso Sato, Takayoshi Yokota, Osameu Ikeda An optimum ultrasonic imaging system using ARMA processing. - Acoustical Imaging, 1981, vol. 11, p. 289-308.
- 18 Pao Yoh-han, Glen V., El-sheerini A. High resolution ARMA model reconstruction for NDE ultrasonic imaging. - Rev. progr. qant. NDT, 1983, vol. 2B, p. 1625-1641.
- 19 Toyokatsu Miyashita, Horst Schwelick, Werner Kessel Recovery of ultrasonic impulse response by spectral extrapolation. - Acoustical Imaging, vol. 14, 1984, p. 247-256
- 20 Базулин Е.Г. Получение изображения рассеивателей с продольным сверхразрешением по многочастотным цифровым акустическим голограммам при построении AR-модели спектров эхосигналов. – Акустический журнал, 1993, т. XXXIX, № 2, с. 213-222.
- 21 Базулин Е.Г. Применение методов сверхразрешения для анализа «тонкой» структуры вертикально ориентированных подповерхностных трещин. - Дефектоскопия, 1995, № 10, с. 9-13.
- 22 Faur M., Morisseau P., Poradis L. Ultrasonic data inversion for outer surface defects characterization. – 7th European conference on nondestructive testing, Copenhagen, 26-29 may 1998, p. 2429-2436.
- 23 Jaynes E.T. On the Rationale of maximum entropy methods. – Proc. Inst. Electr. Eng., vol. 70, 1982, p. 939-952.
- 24 Shannon C.R., A mathematical theory of communication. – Bell Systems Technical Journal, vol 27, 1948, p. 379-423.
- 25 Freiden B.R., Restoring with maximum likelihood and maximum entropy. – Journal of The Optical Society of America, vol. 62, 1972, p. 511-518.

- 
- 26 Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. (изд. 3-е, исправл.) – М.: Наука 1986. - 287 с.
- 27 Mottershead C.T., Maximum Entropy Tomography. – Maximum Entropy and Bayesian Methods, 1996, p. 425-436.
- 28 Demoment G. and Mohammad-Djafari A. Maximum entropy Fourier synthesis with application to diffraction tomography. – Applied Optics, vol. 26, 1987, p. 1745-1754.
- 29 Mohammad-Djafari A. and Nguyen M. K. Bayesian approach with the maximum entropy principle in image reconstruction from microwave scattered field data. – IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 13, 1994, p. 254-262.
- 30 Nityananda R. and Narayan R. Maximum entropy image restoration in astronomy. – Annual review Astron. Astrophys, vol. 24, 1986, p. 127-170.
- 31 Wernecke S.J., D'Addario L.R. Maximum Entropy image reconstruction. – IEEE Transactions on Computers, vol. 26, 1977, p. 351-364.
- 32 Hore P.J. Maximum Entropy and nuclear magnetic resonance. – Maximum Entropy in Action, Oxford: Clarendon Press, 1991, p. 41-72.
- 33 David. J. Battle Maximum Entropy Regularization Applied To Ultrasonic Image Restoration. – University of Sydney, 1999, p. 221.
- 34 Базулин А.Е., Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения качества изображения рассеивателей. – Акустический журнал, 2005, т. LI, № 4, с. 1-13.
- 35 Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis. – Oklahoma City, OK, 1967.
- 36 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. Под редакцией Ермолова И.Н. – М.: Машиностроение, 1986. – 278 с.
- 37 Kullback S. Information Theory and Statistics. – New York. 1959.
- 38 Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: «Радио и связь». 1986, 304 с.
- 39 Леонов А.С. Регуляризирующие функционалы общего вида для решения некорректных задач в пространствах Лебега. – Сибирский математический журнал, т. 44, №6, 2003, с. 1295-1309.
- 40 Coleman T.F. and Y. Li. An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds. – SIAM Journal on Optimization, vol. 6, 1996, p. 418-445.
- 41 Bryan R.K, Skilling J. Maximum entropy image reconstruction: General algorithm. – Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 211, 1984, p. 111-124.

- 
- 42 Морозов В.А. Алгоритмические основы методов решения некорректных задач. – Вычислительная математика и программирование, 2003, т. 4, с. 130-141.
- 43 Валяшко Г.М., Страхов В.Н. Алгоритм адаптивной регуляризации линейных некорректных задач. – Доклады АН СССР, 1981, т. 259, №3, с. 100-113.
- 44 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 для паспортизации пьезопреобразователей ультразвукового неразрушающего контроля. - Дефектоскопия, 1993, №2, с. 24-29.
- 45 Качанов В.К., Раппопорт Д.А., Мозговой А.В. Разработка новых методов ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов на основе использования радиолокационных сигналов. - Дефектоскопия, 1990, №9, с. 9-20.
- 46 Базулин Е.Г. Бадалян В.Г. Использование сложных сигналов для повышения помехозащищенности процесса регистрации цифровых акустических голограмм. Судостроительная промышленность. Серия: акустика, 1990, №6, с. 92.
- 47 Guide to Calibration and setting-up of ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws. BS 7706: 1993.
- 48 Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 томах, под общей редакцией Клюева В.В., т. 3: Ультразвуковой контроль / Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.