

УДК 620.179

## ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК И УНИВЕРСАЛЬНОГО СКАНЕРА

С. С. СЕРГЕЕВ, С. Л. МЕЛЬНИКОВ

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

UDC 620.179

## FEATURES OF ULTRASONIC TESTING OF WELDED SEWING WITH THE USE OF PHASED GRIDS AND UNIVERSAL SCANNER

S. S. SERGEEV, S. L. MELNIKOV

### Аннотация

Рассмотрены вопросы совершенствования технологии ультразвукового контроля сварных соединений на основе применения дефектоскопов с фазированными антенными решетками. Проведены теоретические и экспериментальные исследования и показаны возможности обеспечения равномерности чувствительности при контроле сварных швов в заданном диапазоне углов ввода.

### Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, фазированная решетка, чувствительность, сканер.

### Abstract

The problems of improving the technology of ultrasonic testing of welded joints based on the use of flaw detectors with antennas phased grids are considered. Theoretical and experimental studies have been carried out and the possibilities of ensuring the uniformity of sensitivity in the control of welded joints in a given range of input angles are shown.

### Key words:

ultrasonic testing, phased grids, sensitivity, scanner.

Ультразвуковые системы с фазированными решетками потенциально могут использоваться практически для любого неразрушающего контроля, где традиционно использовались обычные ультразвуковые дефектоскопы. Осмотр результатов сварки и обнаружение трещин являются наиболее важными практическими задачами, и эти испытания проводятся во многих отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, энергетическую, нефтехимическую, при поставке металлических заготовок и трубной продукции, строительстве и эксплуатации трубопроводов.

Преимущества технологии фазированных решёток перед обычными ультразвуковыми преобразователями (ПЭП) состоят в ее возможности использовать несколько элементов, чтобы управлять, фокусировать, и сканировать объект посредством одного преобразователя. Это значительно



упрощает обследование объектов со сложной геометрией. Небольшой размер преобразователя и возможность перемещать луч без перемещения ПЭП, также помогает осмотру таких объектов в ситуациях, где есть ограниченный доступ для механического сканирования. Секторное сканирование, как правило, используется для контроля сварного шва. Возможность проверить швы с различными углами ввода ультразвука одним преобразователем значительно увеличивает вероятность обнаружения различного рода аномалий. Электронная фокусировка оптимизирует форму и размер пучка в предполагаемом месте дефекта, что существенно повышает вероятность его обнаружения. Возможность сосредоточиться на нескольких глубинах улучшает возможность оценки критических дефектов при объемном прозвучивании. Фокусировка может значительно улучшить отношение сигнал-шум в сложных случаях, а электронное сканирование от многих групп элементов позволяет быстро создать изображения S-развёртки. Возможность одновременного прозвучивания с разными углами ввода и сканирование большой площади образца линейным перемещением ПЭП увеличивает скорость проверки. Контроль преобразователем с фазированной решёткой в несколько раз производительнее традиционной проверки с обычным ультразвуковым преобразователем.

Технология контроля с использованием в качестве преобразователя линейной фазированной решетки основана на возможности программного управления акустическим полем излучения при сканировании объекта. При этом преобразователь выполняет функции излучателя с переменным углом ввода, т. е. обеспечивается качание луча в определенном угловом диапазоне в вертикальной плоскости. Таким образом, можно сформировать секторную развертку (S-скан), на которой отображается вертикальное сечение объекта контроля с кодированием амплитуды эхо-сигналов от различных неоднородностей с определенной цветовой гаммой. Кроме возможности секторного сканирования при неподвижном преобразователе имеется возможность управления диаграммой направленности излучателя, т. е. возможность изменения фокусного расстояния и размеров фокусного пятна.

Практическое применение данной технологии при контроле сварных швов различного типа показало реальное ее преимущество перед традиционным эхоимпульсным методом:

– преобразователь с линейной решеткой может обеспечить сканирование в диапазоне углов  $\pm 20^\circ$  с равномерностью чувствительности не хуже 6дБ;

– применение наклонных призм в качестве формирующих линий поддержки обеспечивает расширение диапазона углов ввода в объект контроля продольных или сдвиговых волн, что облегчает обнаружение разноориентированных дефектов;

- возможность фокусировки звукового пучка на различных расстояниях позволяет повысить чувствительность контроля и фронтальную разрешающую способность и выявлять мелкие неоднородности;

- траектория сканирования объекта существенно упрощается и сокращается по длине, т. е. фактически достаточно при толщинах основного металла до 30 мм проводить перемещение ПЭП вдоль шва по одной линии;

- современные дефектоскопы позволяют записывать полученные развертки в реальном времени и формировать отчеты по контролю в виде изображений, что удобно для оператора при оценке качества контролируемого объекта.

Существенным преимуществом применения фазированных решеток является сокращение затрат на подготовку контактных поверхностей объекта, что повышает производительность контроля. Особенно это проявляется при обследовании объектов в период эксплуатации, когда металлические поверхности подвергаются коррозии и загрязнениям.

Наряду со всеми указанными выше преимуществами технологии есть ряд негативных моментов, которые должны быть учтены при проведении контроля. Следует отметить, что независимо от типа отражателя на амплитуду эхо-сигналов от одинаковых экранов, расположенных в пределах прозвучиваемого поперечного сечения и озвучиваемых способом секторного сканирования, влияют несколько факторов, причем степень влияния каждого из них зависит от реализуемого угла ввода:

- эффективный размер активной апертуры преобразователя;
- расстояние от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча;
- затухание в призме (изменение длины хода луча по призме);
- коэффициент прозрачности по энергии на границе призма-объект;
- длина хода луча по контролируемому материалу.

Для обеспечения равномерности чувствительности в пределах диапазона углов качания пучка при секторном сканировании требуется компенсация зависимости амплитуды эхо-сигнала от всех упомянутых факторов. Это может быть достигнуто расчетными, методическими и аппаратными средствами при настройке дефектоскопа.

При внедрении фазированных антенных решеток (ФАР) в производство появилась проблема реализации некоторых требований, предъявляемых к традиционным методам УЗК. Одной из проблем является вынужденная ограниченность количества применяемых фокальных законов, следствием чего является неравномерность чувствительности прибора по полю изображения.

Например, необходимо проконтролировать зону 40 x 50 мм, для этого при шаге визуализации 1 мм нужно использовать 2000 фокальных законов. Учитывая, что производительность визуализации должна быть не менее 20...30 кадров в секунду, количество операций получается слишком большим для современной вычислительной техники. Поэтому для получения





приемлемой частоты обновления экранного изображения в каждом режиме работы прибора на ФАР обычно используется намного меньшее число фокальных законов. И, как следствие, в изображении только небольшая зона воспроизводится с максимальной чувствительностью к отражателям и наилучшим пространственным разрешением. Вне этой зоны характеристики хуже, и чем дальше от нее, тем еще хуже. Если прибор откалибровать по чувствительности в зоне наилучшего качества изображения, то в оставшейся рабочей области калибровка не будет выполняться.

Именно по этим причинам технология фазированной решетки до сих пор является вспомогательной, позволяющей выявить дефекты и оценить их примерные размеры, а также наглядно и удобно для восприятия их визуализировать. Точная оценка размеров дефектов при использовании метода фазированных решеток возможна лишь при фокусировке ультразвука в месте дефекта в момент его нахождения по А-скану, что фактически не отличается от традиционных методов контроля.

По действующим нормативным документам по проведению УЗК оценку качества изделий осуществляют по эквивалентной отражающей способности несплошности с применением АРД-диаграмм.

Сложность применения экспериментально построенных АРД-диаграмм для ФАР заключается в необходимости настройки на множестве одинаковых отражателей, выявленных под разными углами. В Беларуси для настройки чувствительности приняты плоскодонные отражатели, что вызывает определенные сложности для создания АРД диаграмм. Так для настройки чувствительности даже для ограниченного числа углов из сектора от 30 до 70 градусов, например, с шагом 5 градусов потребуется 8 паспортизированных образцов, содержащих набор одинаковых плоскодонных отражателей на разных глубинах. Кроме того, сложность заключается и том, что из-за наличия фокусировки зависимость между площадью плоскодонного отражателя и его амплитудой перестает быть линейной, поэтому для достоверной оценки отражающей способности несплошностей, превышающих 1...2 длины волны, потребуется еще набор образцов с плоскодонными отражателями, имеющими разные площади.

В связи с этим для настройки чувствительности есть смысл использовать теоретические АРД-диаграммы, рассчитанные по формулам акустического тракта для каждого угла ввода. Например, уравнение акустического тракта при контроле сварных соединений для дискового отражателя площадью  $S_b$  с переменным углом ввода имеет следующий вид:

$$|A(r_N, \alpha_N)| = \frac{S_b \times S_a \times \cos \alpha_N}{\lambda^2 \times (r_N + r_N'(\alpha_N))^2 \times \cos \gamma} \times D_{lt}(\alpha_N) \times e^{[-2 \times (\delta \times r_N + \delta_1 \times r_1(\alpha_N))]},$$

где  $\lambda$  – длина волны в изделии;  $r_N$  – путь ультразвука в изделии;  $r_1(\alpha_N)$  – путь в призме преобразователя;  $r_N'(\alpha_N)$  – путь ультразвука от мнимой пьезопластины до точки ввода в изделие;  $D_{lt}(\alpha_N)$  – коэффициент прохождения

через границу призма-изделие;  $\delta$  и  $\delta_1$  – затухание ультразвука в изделии и призме;  $\gamma$  – угол наклона призмы;  $S_a$  – площадь фазированной решётки;  $S_b$  – площадь дискового отражателя;  $\alpha_N$  – угол ввода пучка в ОК.

Путь ультразвука от мнимой пьезопластины до точки ввода в изделие в зависимости от угла ввода определяется по формуле

$$r'_N(\alpha_N) = \frac{r_1 \times C_{лп} \times \cos \alpha_N}{C_t \times \cos \beta(\alpha_N)},$$

где  $C_{лп}$  – скорость продольной волны в призме;  $C_t$  – скорость поперечной волны в стали;  $\beta(\alpha_N)$  – угол падения пучка на ОК.

Коэффициент прохождения через границу призма-изделие с учетом изменения угла ввода

$$D_{лт}(\alpha_N) = \frac{4 \times Z_{пад}(\alpha_N) \times Z_{прел}(\alpha_N)}{(Z_{пад}(\alpha_N) + Z_{прел}(\alpha_N))^2};$$

$$Z_{пад}(\alpha_N) = \left( \frac{Z1}{\cos \beta(\alpha_N)} \right) \times \cos^2(2 \times \alpha_N);$$

$$Z_{прел}(\alpha_N) = \left( \frac{Z2}{\cos \alpha_N} \right) \times \sin^2(2 \times \beta(\alpha_N)),$$

где  $Z1$  – акустический импеданс призмы;  $Z2$  – акустический импеданс ОК.

В результате проведенных расчетов были получены АРД-диаграммы для плоскодонных отражателей в виде диска с различной площадью, пригодные для использования при настройке чувствительности фазированных решёток. Аналогично могут быть построены АРД-диаграммы для других типов дефектов и других объектов и условий контроля.

Для проверки эффективности использования результатов теоретического моделирования были проведены экспериментальные исследования амплитудно-угловых зависимостей эхо-сигналов при контроле фазированной решёткой в сравнении с традиционным эхо-импульсным методом на различных углах ввода. Объектами исследования служили искусственные отражатели в виде пазов, имитирующих плоскостные дефекты (рис. 1).



Рис. 1. Тест-образцы с искусственными отражателями в виде пазов

Контроль фазированной решёткой проводился дефектоскопом Phazor XS (рис. 2, а) с частотой преобразователя 4 МГц и диапазонами уг-

лов ввода: 35–45°, 45–55°, 60–70°. При контроле эхо-методом использовался прибор УД4-76 (рис. 2, б) с преобразователями частотой 2,5 МГц и углами ввода: 40, 55, 65°. В обоих случаях использовалась схема прозвучивания прямым и однократно отраженным лучом. Контроль проводился с усилением 5 дБ для прибора Phazor XS, для УД4-76 использовалось усиление 49,3 дБ. За 100 % амплитуды был выбран сигнал от паза высотой 3 мм при контроле с углом ввода 40° для традиционного эхо-метода и диапазоном углов 35–45° для фазированной решётки.

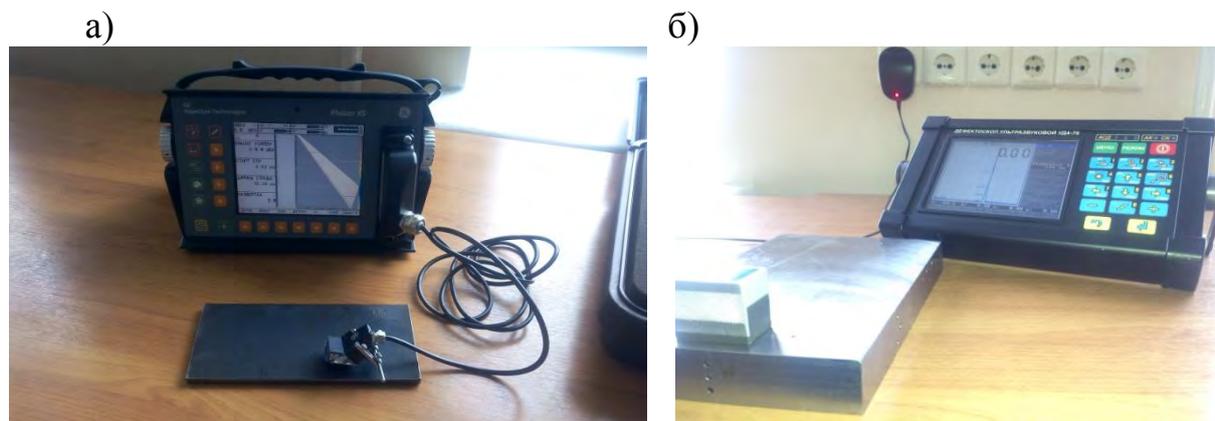


Рис. 2. Оборудование для контроля: а – ФАР-методом; б – эхо-методом

Результаты экспериментального исследования тест-образцов с вертикальным пазом отображены на графиках (рис. 3, 4, 5).

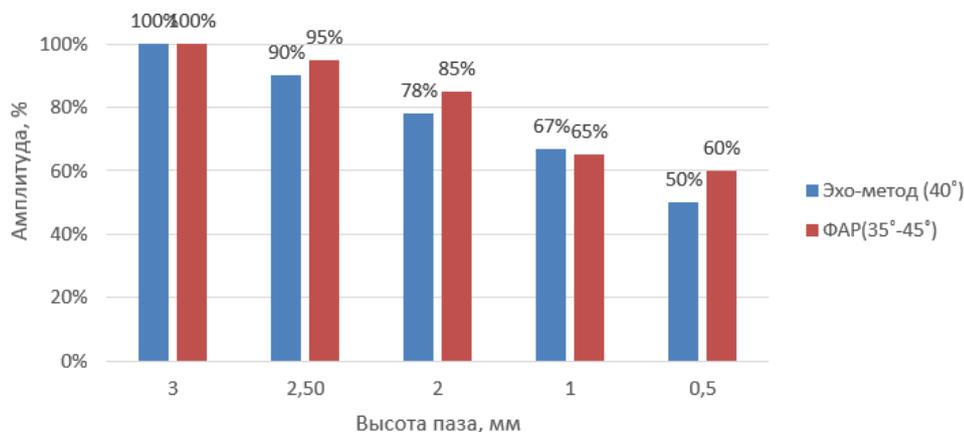


Рис. 3. Чувствительность при фиксации пазов с углом ввода 40° (эхо-метод) и диапазоном углов 35–45° (ФАР)

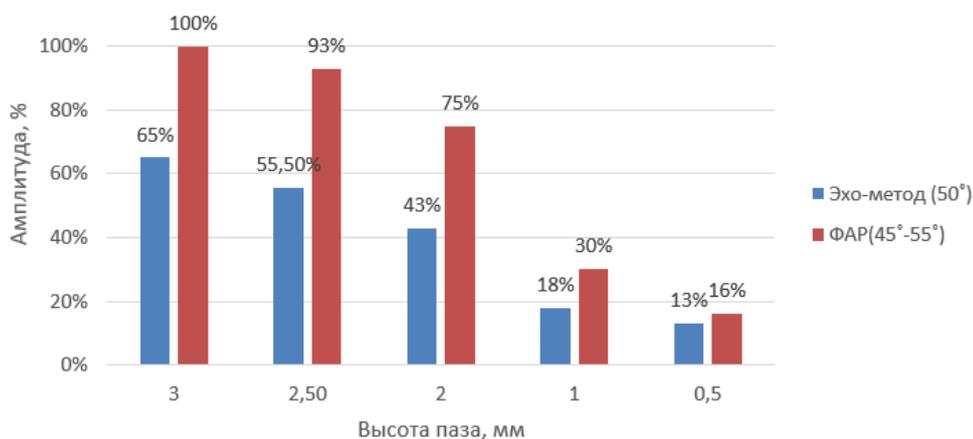


Рис. 4. Чувствительность фиксации пазов с углом ввода  $50^\circ$  (эхо-метод) и диапазоном углов  $45-55^\circ$  (ФАР)

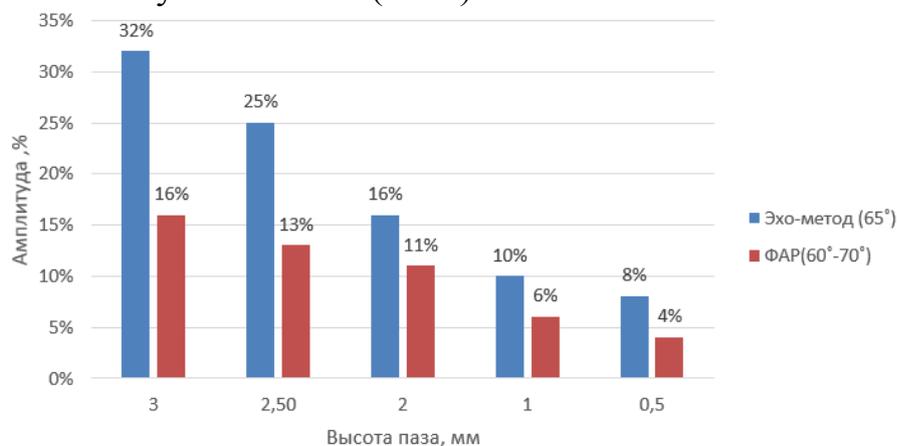


Рис. 5. Чувствительность фиксации пазов с углом ввода  $65^\circ$  (эхо-метод) и диапазоном углов  $60-70^\circ$  (ФАР)

Из приведенных графиков видно, что на угле ввода  $40^\circ$  чувствительность при контроле ФАР и эхо-методами сопоставимы. На угле ввода  $50^\circ$  чувствительность фазированной решётки практически в 2 раза выше по сравнению с традиционным эхо-методом, а на угле  $65^\circ$  чувствительность у фазированной решётки почти 2 раза ниже по сравнению с эхо-методом.

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что технология ФАР обеспечивает высокую чувствительность контроля на диапазоне углов ввода  $35-50^\circ$  и с увеличением угла ввода чувствительность значительно падает, следовательно, при контроле ФАР-методом при выявлении дефекта на углах больших, чем  $50^\circ$ , необходимо использование специальных расчетных или аппаратных механизмов компенсации изменений амплитуд эхо-сигналов от равновеликих отражателей, что позволяет обеспечить равномерность чувствительности в пределах поперечного сечения сварного объекта контроля, прозвучиваемого способом секторного сканирования.

Для автоматизации процесса УЗК применяются механизмы сканирования с прикрепленной акустической системой. Наибольшее распространение в мире получили системы, использующие продольное сканирование,

которое проще и надежнее, чем системы с возвратно-поступательным сканированием. Данные системы оснащаются одноэлементными пьезоэлектрическими датчиками, либо многоэлементными датчиками (монолитный корпус с несколькими пьезоэлементами, расположенными под разными углами). Однако в последнее время автоматизированные комплексы стали оснащать системами с ФАР, что значительно повысило информативность проводимого контроля.

На рис. 6 представлено разработанное универсальное переносное сканирующее устройство для контроля сварных соединений цистерн, резервуаров и прочих листовых и трубных конструкций. Сканер представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую позиционирование ультразвуковых преобразователей, в том числе и фазированных решеток относительно сварного соединения, прижим ПЭП, перемещение ПЭП вдоль шва.

При этом сканер обеспечивает:

- перемещение по заданной траектории с возможностью регулировки скорости перемещения от 5 до 140 мм/с;
- возможность корректировки положения относительно сварного шва;
- возможность работы как на продольных, так и на кольцевых сварных швах;
- настройку позиционирования преобразователей относительно сварного шва;
- фиксацию координаты перемещения, с разрешающей способностью не менее 1 мм;
- возможность дистанционного управления;
- нанесение равномерного слоя контактной смазки на объект контроля.

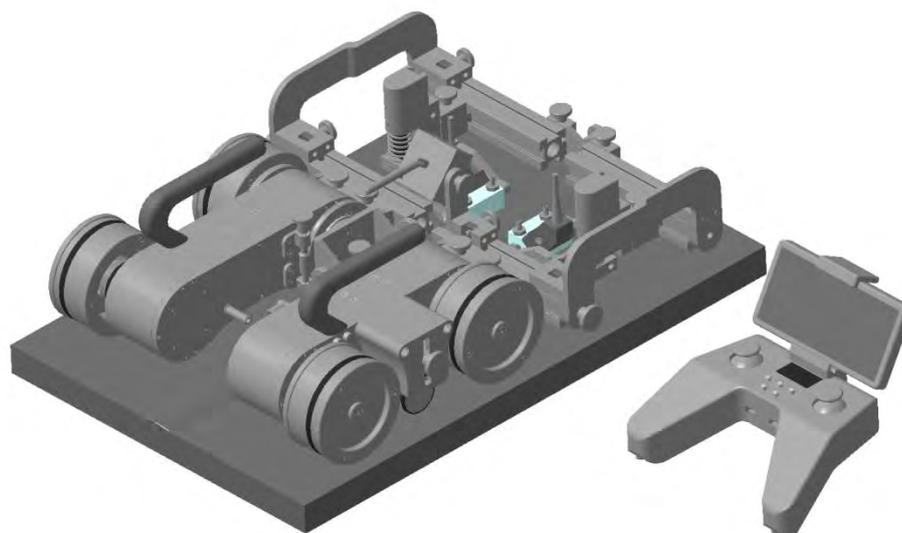


Рис. 6. Универсальное переносное сканирующее устройство

Сканирующее устройство по сравнению с аналогами, представленными на рынке, имеет более компактную и удобную форму, возможность мо-

дульной замены блоков преобразователей. Конструктивное исполнение обеспечивает возможность контроля более широкого спектра промышленных объектов (сварные кольцевые и продольные швы труб, тавровые соединения, стыковые соединения пластин и другие объекты сложной формы). Кроме того, следует отметить наличие возможности дистанционного управления с современной следящей системой, а также более привлекательную стоимость по сравнению с подобными устройствами. Таким образом, разработанное устройство в совокупности с дефектоскопом обеспечивают более высокие метрологические характеристики средств контроля сварных соединений и, соответственно, возможность обнаружения разноориентированных дефектов и их идентификацию на новом качественном уровне.

### **Выводы**

Усовершенствована теоретическая модель акустического тракта для ультразвукового контроля сварных швов с использованием линейной фазированной решетки и наклонной призмы на различных углах ввода, учитывающая влияние изменения:

- эффективного размера активной апертуры преобразователя;
- расстояния от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча;
- затухания в призме (изменение длины хода луча по призме);
- коэффициента прозрачности по энергии на границе призма-объект;
- длины хода луча по контролируемому материалу.

Получены теоретические графики чувствительности для различных искусственных направленных и ненаправленных отражателей при различных углах ввода.

Экспериментально получены амплитудно-угловые зависимости эхо-сигналов от искусственных ненаправленных отражателей, которые позволили сформировать методику настройки прибора с фазированной решеткой при контроле сварных швов, учитывающую влияние всех основных дестабилизирующих факторов и обеспечивающую равномерность чувствительности в пределах диапазона углов качания пучка при секторном сканировании, что в целом способствует повышению достоверности и производительности контроля реальных объектов. Одновременное использование предложенных механизмов компенсации изменений амплитуд эхо-сигналов от равновеликих отражателей, рассмотренных в работе, позволяет обеспечить равномерность чувствительности в пределах поперечного сечения материала, прозвучиваемого способом секторного сканирования, даже в случаях, когда амплитуда эхо-сигнала существенно зависит от направления волны, взаимодействующей с отражателем.

