

# **Одновременное измерение скорости ультразвуковой поперечной волны и толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами с использованием двух антенных решёток**

Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М.

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, Москва, ул. Твардовского, д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: [bazulin@echoplus.ru](mailto:bazulin@echoplus.ru), [ismailovgm@gmail.com](mailto:ismailovgm@gmail.com)

В статье рассматривается метод определения неизвестной скорости распространения сдвиговых ультразвуковых волн и неизвестной толщины объекта контроля. Предлагается использовать две антенные решётки, работающие в режиме двойного сканирования, когда регистрируются эхосигналы, излучённые и принятые всеми парами элементов антенных решёток. Антенные решётки на призмах устанавливаются на поверхность объекта контроля по направлению «друг к другу». Разработан алгоритм обработки измеренных эхосигналов с использованием метода подобному методу наименьших квадратов. Использование алгоритма позволяет определить одновременно скорость звука и толщину объекта контроля с плоскопараллельными границами с точностью не менее чем 0.5%. В статье исследованы факторы, влияющие на точность измерений, предложены пути их устранения или минимизации. Приведены результаты численных экспериментов и результаты применения метода на трёх образцах со сравнением с результатами измерений прибором ИН-5101А.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, антенная решётка, двойное сканирование, измерение скорости звука, измерение толщины объекта контроля, метод минимума невязки.

## **1. Введение**

В практике ультразвукового контроля часто возникают задачи по измерению толщины объекта контроля и скорости продольной или поперечной волны в нём. Для определения в объекте контроля мест наибольшего локального утонения применяют ультразвуковые приборы для измерения толщины. Приборы, измеряющие скорость продольных и поперечных волн разной поляризации в объектах контроля, позволяют получать информацию о физико-механических свойствах материала, например, о его напряжённо-деформируемом состоянии.

Основным способом измерения толщины является эхо-метод, позволяющий при известной скорости звука и по временному интервалу между донными сигналами рассчитывать толщину объекта контроля. В случае использования прямого совмещенного преобразователя толщину объекта контроля определяют, анализируя время прихода донных эхосигналов при многократном отражении. Чтобы исключить из расчётов время пробега в призме измеряют суммарный отсчет времени  $\Delta t_n = t_n - t_1$  между первым и  $n$ -ым донными эхосигналами. Расчетная формула для контактного варианта имеет вид

$$h = \frac{c\Delta t_n}{2(n-1)}, \quad (1)$$

где  $c$  – известная скорость распространения ультразвука в объекте контроля. Общая погрешность, возникающая при оптимальных условиях контроля объекта с плоскопараллельными гладкими поверхностями, перпендикулярными акустической оси, определяется выражением [1]

$$\frac{\Delta h}{h} = 2 \left( \frac{\Delta t}{\Delta t_n} + \frac{0.05\lambda}{2h} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – точность измерения временных интервалов,  $\lambda$  – длина волны в объекте контроля. Из этой формулы следует, что при измерениях на образцах толщиной более 10 мм, легко достичь точности 0.1%.

Также как и при измерении толщины, основным методом измерения скорости звука в объекте контроля является эхо-метод. Отличие состоит в том, что в измеряемой величине  $\Delta t_n$  в случае толщинометрии неизвестной считают величину  $h$ , а при измерении скорости –  $c$ . Для измерения скорости продольных волн применяют толщинометры с прямыми преобразователями, а для измерения скорости поперечных волн используют ЭМА-преобразователя, прямые преобразователи со специальными пьезоэлементами и наклонные преобразователи. Погрешность измерения скорости звука находится в прямой зависимости с погрешностью измерения пути ультразвука в объекте контроля и времени  $\Delta t_n$  пробега импульса по этому пути. Предельная точность измерения скорости соответствует 0.01...0.001% [1]. Следует отметить тот факт что, при высокоточном измерении штангенциркулем толщины оператор может столкнуться с проблемой ограниченного доступа к объекту контроля. В этом случае измерение толщины стенки трубопровода представляет собой нетривиальную задачу.

Задача измерения скорости звука относится к акустическим методам, широко используемым для определения физико-механических свойств объекта контроля. Упругая волна, распространяющаяся в твердом теле, характеризуется амплитудой колебаний, фа-

зой, частотой, векторами распространения и поляризации. По параметрам распространения упругой волны можно судить о физических свойствах и техническом состоянии конструкционного материала. Эти методы основаны на аналитической или корреляционной связи между значением скорости звука и физико-механическим свойством объекта. Так, все три упругих постоянных материала (модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона) однозначно определяются по измеренным значениям скоростей распространения продольной и поперечной волны [2].

Теория акустоупругости [2] устанавливает связь между скоростью упругих волн и механическим напряжением. Однако, эта зависимость весьма слабая ввиду её нелинейного характера. Поэтому, для того, чтобы определять напряжения, действующие в конструкционных материалах, с погрешностью 10 и менее процентов от предела текучести, требуется провести прецизионные измерения скоростей ультразвуковых волн с относительной погрешностью 0.1-0.01 % [3].

Другой важной областью, в которой необходимо точно знать скорость звука и толщину, является ультразвуковой контроль, а конкретнее, когерентные методы визуализации [4], в которых используется фазовая характеристика поля. Особенно важна точная информация о скорости звука и толщине объекта контроля принципиальна в алгоритмах реконструкции изображения отражателей, учитывающих многократное отражение импульсов. В статье [5] рассмотрены когерентные методы: **Synthetic Aperture Focusing technique (SAFT)**, корреляционный метод и метод максимальной энтропии (ММЭ) для получения изображений. В ней показано, что для получения качественных изображений отражателей с учётом переотражений импульса от границ необходимо с точностью не менее 0.5% знать толщину объекта контроля и скорость звука в нём.

При измерении скорости звука или толщины объекта контроля эхо-методом, необходимо изначально знать одну из этих величин. В работе [6] был предложен метод для одновременного определения скорости и толщины многослойных объектов. Однако, результаты экспериментов показали, что точность расчётов по предложенному методу не более 3%, что значительно уступает точности измерений в 0.5%, которую должен обеспечить разработанный алгоритм.

Совершенствование технологий изготовления ультразвуковых антенных решёток и акустических многоканальных систем излучения и приёма ультразвука привело к созданию относительно дешёвых дефектоскопов [7], [8], [9], использующих технологию фазированных антенных решёток (ФАР-дефектоскопы). Элементы антенной решётки имеют размеры меньше длины волны, что обеспечивает широкую диаграмму направленности [10] и позволяет измерить огромное количество импульсов на продольных и поперечных

волнах вертикальной поляризации, отражённых от границ объекта контроля и от дефекта. Если антенной решёткой измерить эхосигналы в режиме двойного сканирования [11], когда регистрируются эхосигналы, излученные и принятые всеми парами элементов антенной решётки, то по ним можно определить толщину объекта контроля и скорость поперечной или продольной волны.

В настоящей статье предлагается метод по одновременному определению скорости звука и толщины с относительной погрешностью (точностью) не менее 0.5% с использованием двух антенных решёток, работающих в режиме двойного сканирования, в объекте контроля с плоскопараллельными границами.

## 2. Описание метода

Пусть для излучения и приёма ультразвуковых волн используются одинаковые антенные решётки, установленные на призмы с углом наклона  $\beta$  из материала со скоростями продольной и поперечной волны и плотностью  $\{c_{w,l}, c_{w,s}, \rho_w\}$  (Рис. 1). Антенные решётки состоят из  $N_x$  элементов размерами  $\delta x$ , расположенных на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга. Скорости звука и плотность объекта контроля обозначим  $\{c_l, c_s, \rho\}$ . Антенная решётка с левой стороны служит для излучения ультразвуковых импульсов, а с правой для приёма.

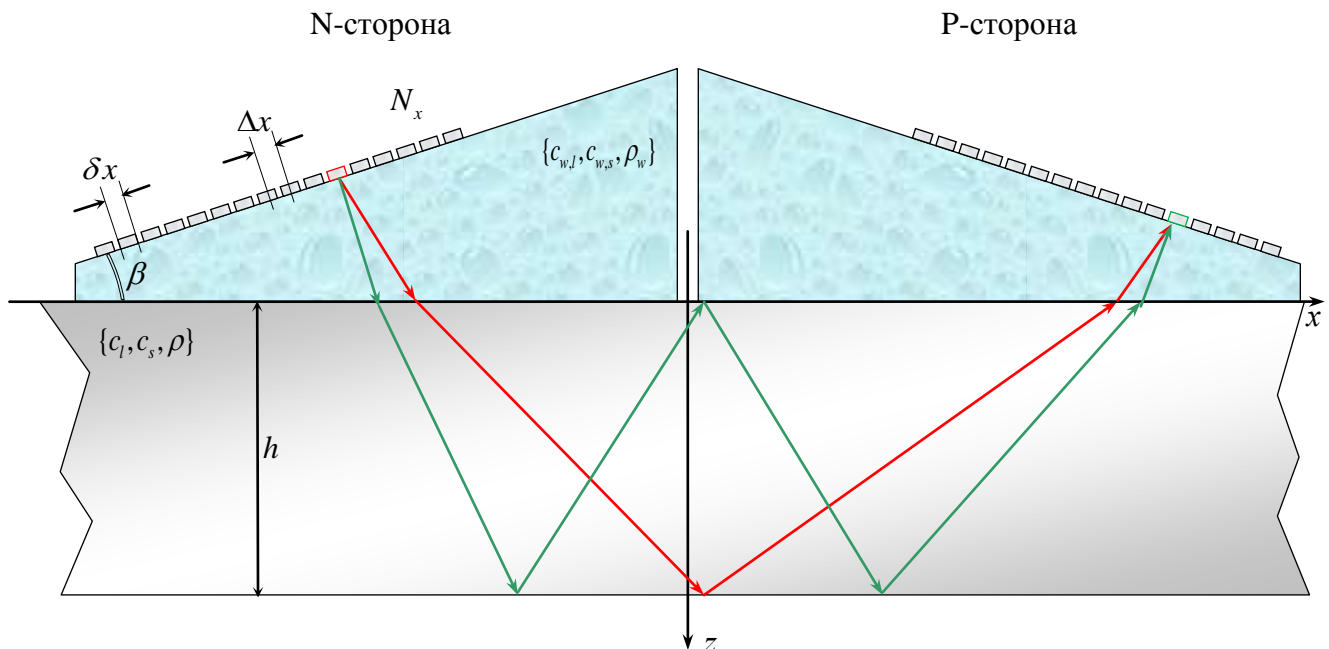


Рис. 1 Схема проведения измерений двумя антенными решётками, установленными на призмы.

Регистрация эхосигналов  $p(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, t)$  в режиме двойного сканирования происходит следующим образом. Первый пьезоэлемент излучающей антенной решётки излучает зондирующий импульс, а все пьезоэлементы приёмной антенной решётки принимают эхосигналы, как отражённые от дна, так и, в случае многократных отражений, от поверхности образца. Далее происходит излучение вторым пьезоэлементом излучающей антенной решётки и приём всеми пьезоэлементами приемной антенной решётки. Таким образом, поочередно каждый из элементов излучающей антенной решётки излучают импульс, а все пьезоэлементы приёмной антенной решётки принимают эхосигналы.

Введем следующие обозначения. Такое событие как преломление на поверхности или отражение от поверхности будем обозначать буквой **T**, а буквой **B** - отражение от дна. Тип волны после события будем обозначать буквами **L** (продольная), **S** (поперечная) и **R** (Рэлеевская). К примеру, обозначение **TBT(SS)** означает, что эхосигнал преломился на границе призма-объект контроля, далее произошло отражение от дна, после чего снова преломление на границе объект контроля-призма приёмной антенной решётки. Обозначение **TBTBT(SSSS)** описывает уже не одно отражение, а три, сначала от дна, потом от поверхности объекта контроля и снова от дна. На Рис. 1 траектория распространения импульса по акустической схеме **TBT(SS)** показана стрелками красного цвета, а по акустической схеме **TBTBT(SSSS)** – стрелками зелёного цвета. Причем после каждого отражения или преломления в этих двух схемах тип волны может изменяться. Запись **TBTBT(SLLL)** соответствует ситуации, когда после первого отражения от границы дна объекта контроля поперечная волна переходит в продольную волну и дальше тип волны уже не меняется.

На Рис. 2 показан в растровом виде характерный набор эхосигналов  $p(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, t)$  полученный с помощью двойного сканирования на образце толщиной 34.0 мм двумя 32-х элементными антенными решетками типа PE-5.0M32E0.8P, установленными на 35-и градусные призмы типа T1-35WOR-1. На нём мы видим семейства эхосигналов сформированных по разным акустическим схемам. Самая большая амплитуда у эхосигналов, сформированных по акустической схеме **TBT(SS)**, что естественно, так как призма рассчитана на работу с поперечной волной. Малые размеры элемента антенной решётки позволяют регистрировать эхосигналы на продольных волнах по акустическим схемам **TBT(LL)** и **TBTBT(LLLL)**. Заметны эхосигналы по «экзотической» акустической схеме **TBTBT(SLLL)** и по схеме **TT(R)**.

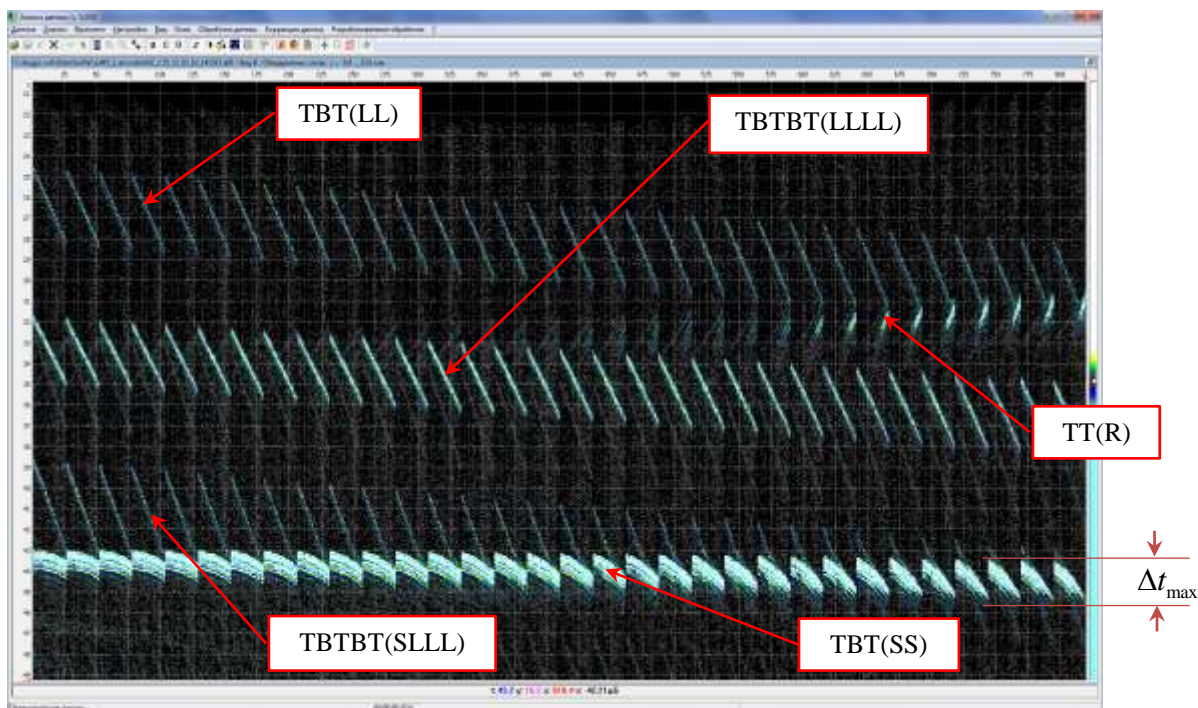


Рис. 2 Вид измеренных эхосигналов  $p(\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_r, t)$ .

Траектория, по которой распространяется импульс от элемента с координатами  $\mathbf{r}_l$  излучающей антенной решётки до элемента с координатами  $\mathbf{r}_r$  приёмной антенной решётки, можно описать в виде последовательности векторов  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{m+3}\}$ , где  $m$  - число отражений от границ образца. Первый вектор в такой последовательности всегда соответствует пути распространения звука в призме излучающей антенной решётки, а последний в призме приёмной решётки. Аналогичным образом для определения скорости распространения импульса вдоль трассы при излучении задаётся список  $\{c_1, c_2, \dots, c_{m+3}\}$ . Первым элементом  $c_1$  в этих списках всегда идет  $c_{l,w}$  - скорость продольной волны в призме излучающей антенной решётки, а последний элемент  $c_{m+3}$  - скорость продольной волны в призме приемной решетки. Остальные элементы могут содержать различные сочетания из продольных  $c_l$  и поперечных  $c_s$  скоростей звука в объекте контроля. Минимально возможный список скоростей для случая  $m = 1$ , то есть вариант работы при однократном отражении импульса от дна на поперечной волне имеет вид  $\{c_{l,w}, c_s, c_s, c_{l,w}\}$  (акустическая схема **TBT(SS)**). Для случая,  $m = 3$ , когда ультразвуковая волна испытывает трехкратное отражение, список скоростей имеет вид  $\{c_{l,w}, c_s, c_s, c_s, c_s, c_{l,w}\}$  (акустическая схема **TBTBT(SSSS)**).

Обозначим через  $\nu = \{c_s, h\}$  список параметров, которые влияют на расчёт оценки эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$ . Если через  $s(t)$  обозначить вид излучённого сигнала, то простейшую оценку измеренного сигнала можно представить в следующем виде

$$\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) = \sum_{\{as\}} s(t - t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r)), \quad \text{где } t_{as}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=1}^{m+3} \frac{|\mathbf{r}_n|}{c_n}, \quad (3)$$

где  $\{as\}$  список используемых при оценке акустических схем.

Определённые трудности представляет расчёт лучевых траекторий  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{m+3}\}$ . Известны аналитические решения данной задачи для прямого луча [11, 12], но её аналитическое решение для произвольного количества отражений является нетривиальной, если не неразрешимой задачей. Для определения пути распространения импульсов можно воспользоваться принципом Ферма [13], гласящим, что распространение света или звука из одной точки в другую в пространстве с заданным распределением скорости  $c(x, z)$  проходит по траектории, вдоль которой свет проходит за минимальное время. Этот подход легко позволяет учитывать такие эффекты, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля, трансформацию типов волн при отражениях и преломлениях на границах разных сред.

Для решения задачи определения скорости звука  $c_s$  и толщины  $h$  объекта можно применить метод наименьших квадратов [14]. С одной стороны имеются экспериментальные эхосигналы  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ , измеренные в режиме двойного сканирования, с другой стороны по формуле (3) можно рассчитать оценку эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  для списка  $\{as\}$  акустических схем. Изменяя неизвестные параметры  $\nu = \{c_s, h\}$ , можно добиться минимальной разницы между сочиненными  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  и экспериментальными данными  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ . Сделать оценку  $\nu$  можно по следующей формуле

$$\hat{\nu} = \arg \min (\chi^2(\hat{\nu})), \quad \text{где } \chi^2(\hat{\nu}) = \|\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) - p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)\|. \quad (4)$$

Используя численные методы, можно найти минимум выражения (4). В настоящей работе использовался метод Нелдера-Мида [15], являющийся методом нулевого порядка. Для случая функции с двумя неизвестными симплексом является треугольник, а схема поиска минимума заключается в сравнении вычисленных значений функции в вершинах треугольника и перемещении симплекса с помощью итерационной процедуры в направлении минимума.

Используя выражения (4) можно расширить число переменных подлежащих оценки. Увеличивая длину списка, можно решать задачу по определению и продольной скорости звука – список будет иметь вид  $\nu = \{c_l, c_s, h\}$ . В число переменных можно включить и угол наклона дна, сняв требование параллельности границ объекта контроля. Используя метод наименьших квадратов можно попытаться решить обратную задачу рефракции, когда по измеренному полю  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$  нужно найти распределение скорости звука  $c_s(x, z)$  в объекте контроля. В этом случае для расчёта оценки поля  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  нужно пользоваться более сложными формулами, нежели формула (3).

## 2.1. Вид функции невязки

Эффективность предлагаемого метода определяется видом функции невязки  $\chi^2(\nu)$ . Если она имеет несколько минимумов или имеет маленький модуль градиента  $\nabla(\chi^2(\nu)) = \left( \frac{\partial}{\partial c_s} + \frac{\partial}{\partial h} \right) \cdot \chi^2(\nu)$ , то нужно предпринимать специальные меры для получения однозначного решения задачи и для увеличения скорости сходимости. Перечислим основные факторы, влияющие на вид функции невязки:

- форма излучаемого сигнала  $s(t)$ ;
- частота дискретизации сигнала  $\Delta t$  и шаг между элементами антенной решётки  $\Delta x$ ;
- угловая апертура антенной решётки  $\alpha_i$ ;
- количество акустических схем  $\{as\}$  используемых при оценке набора эхосигналов;
- операторный шум, который тем меньше, чем точнее физическая модель, описывающая акустический тракт.

Использование в качестве невязки функцию, в которой используются радиосигнал  $s(t)$ , приводит к тому, что  $\chi^2(\nu)$  имеет множество локальных минимумов, при большом значении модуля градиента  $\nabla(\chi^2(\nu))$ . Для устранения локальных минимумов  $\chi^2(\nu)$  помимо радиосигналов можно ввести и сравнение их по огибающим эхосигнала в следующем виде

$$D(\nu; a, a_\epsilon) = a \cdot |\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) - p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)| + a_\epsilon \cdot |\mathfrak{E}(\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)) - \mathfrak{E}(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t))|, \quad (5)$$

где  $a_\epsilon$  и  $a$  – весовые коэффициенты, а  $\mathfrak{E}$  – оператор для расчёта огибающей радиосигнала с помощью преобразования Гильберта. Использование в качестве невязки второго слагаемого, в котором используются функции типа видеосигналов, приводит к тому, что невязка имеет один глобальный минимум, но при меньшем значении градиента, что уменьшает



скорость сходимости. После анализа были выбраны коэффициенты  $a_\epsilon = 1$  и  $a = 0.5$  как близкие к оптимальному решению в смысле уменьшения локальных минимумов и максимального значения градиента. Отметим, что значение  $a$  зависит от вида  $s(t)$ .

Схематический вид функции  $D(v; a, a_\epsilon)$  при оптимальных весовых коэффициентах  $a_\epsilon$  и  $a$ , при отсутствии операторного шума, шума дискретизации и помех при измерениях показан на Рис. 3 слева, где по осям расположены искомые параметры  $c_s$  и  $h$ . Справа дана цветовая шкала, поясняющая, что функция  $D(v; a, a_\epsilon)$  имеет вид вытянутой лунки с глобальным минимумом в середине. Если через  $v_s$  обозначить исходную точку (на Рис. 3 слева отмечена окружностью красного цвета), из которой начинается итерационный поиск минимума функции  $D(v; a, a_\epsilon)$ , то решение будет сходиться в точку  $\hat{v}$ , являющуюся единственным решением. На рисунке схематически красными линиями со стрелками показаны три траектории поиска минимума из трёх разных начальных точек, которые сходятся к одному решению, отмеченному на Рис. 3 слева окружностью зелёного цвета.

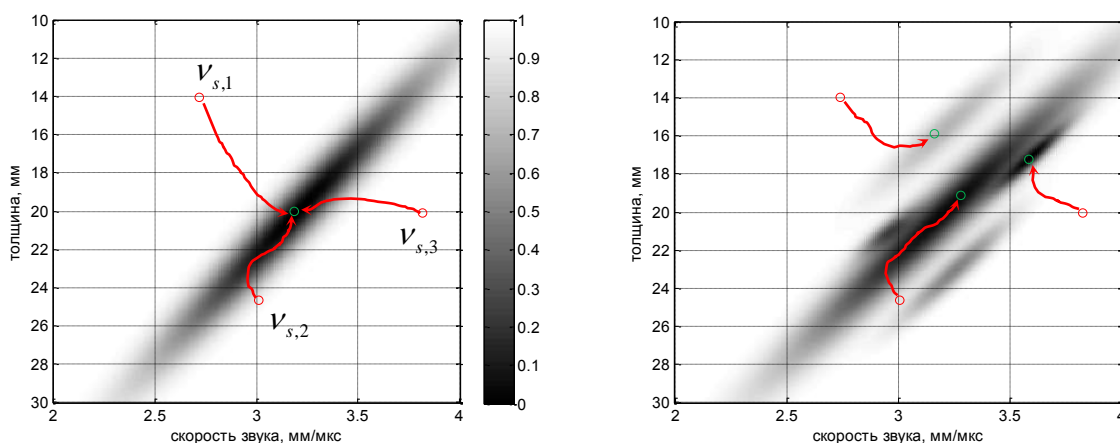


Рис. 3 Схематическое представление идеального (слева) и реального (справа) вида функции  $D(v; a, a_\epsilon)$ .

Наличие измерительного и операторного шума приводит к появлению локальных минимумов функции  $D(v; a, a_\epsilon)$ , вид которой схематически изображён на Рис. 3 справа.

Из-за появления локальных минимумов решение выходя из тех же начальных точек  $v_{s,1}$ ,  $v_{s,2}$  и  $v_{s,3}$  может «застрять» в локальном минимуме так и не «добравшись» до глобального минимума, что отмечено на рисунке траекторией поиска решения. Кроме того, шумы измерения и дискретизации также приводит к появлению множества случайно расположенных локальных минимумов. Простейший выход из сложившейся ситуации заключает-

ся в том, что, зная примерные значения скорости звука и толщины, выбрать в её окрестности множество начальных точек  $\{v_s\}$  и получить множество решений  $\{\hat{v}\}$ , усреднение которых и даст решение задачи. Альтернативным вариантом является использование более совершенного алгоритма поиска минимума функции со многими локальными минимумами.

Дискретизация эхосигналов по времени и пространству приводит к тому, что значение функции  $D(v; a, a_e)$  будет меняться скачками. То есть, если функция  $D(v; a, a_e)$  достигла минимума, то её значение перестает меняться при малых изменениях  $\delta c_s$  и  $\delta h$ , и поиск минимума станет невозможным. Шаг дискретизации по времени  $\Delta t$  и пространственный шаг  $\Delta x$  определяют значения  $\delta c_s$  и  $\delta h$ , которые должны обеспечить заявленную погрешность измерений 0.5%. При частоте дискретизации эхосигналов 25 МГц функция  $D(v; a, a_e)$  в районе минимума не меняется при изменении  $c_s$  и  $h$  в диапазоне около 2.0%, что вчетверо меньше той точности, на достижение которой нацелена данная работа. А при частоте 50 МГц, расчёт отклонения значений на границах этой линии дает относительную погрешность в 0.3%. Таким образом, для того чтобы обеспечить точность расчета скорости поперечной волны и толщины объекта контроля в 0.5% частота дискретизации эхосигналов должна быть не менее 50 МГц.

Важным критерием проведения измерений являются угловые размеры  $\alpha_t$  излучающей апертуры антенной решётки. Чем больше угловые размеры апертуры антенной решётки  $\alpha_t$ , тем больше разница  $\Delta t_{\max}$  (см. Рис. 2) между максимальным и минимальным временем пробега от элементов излучающей антенной решётки до элемента приёмной, и тем больше модуль градиента функции невязки  $\chi^2(v)$  или  $D(v; a, a_e)$ . Угловой размер апертуры увеличивается с ростом количества элементов антенной  $N_x$  и уменьшается с увеличением толщины объекта контроля  $h$ . Это означает, что при увеличении толщины или при  $\Delta x \rightarrow 0$  эхосигналы для любой пары пьезоэлементов перестанут отличаться друг от друга, и функция  $D(v; a, a_e)$  вырождается в «траншею». То есть, используя два преобразователя невозможно определить скорость и толщину, так как решений будет бесконечно много. Была проведена оценка необходимого количества элементов  $N_x$  при фиксированной  $\Delta x = 0.8$  мм для разных толщин с критерием  $\Delta t_{\max} = 1.5T_c$ , где  $T_c$  – центральная частота антенной решётки, для сохранения постоянного значения  $\alpha_t$ . Для того чтобы проводить измерения антенной решеткой с количеством элементов  $N_x = 32$  толщина объекта контроля не должна превышать 18 мм, а для достижения при измерении объекта контроля

70 мм нужно использовать антенные решётки с 70-ю элементами (Табл. 1). Альтернативам вариантом может быть проведение нескольких измерений двумя антенными решётками с 32-я элементами, но при увеличении расстояния между призмами (Рис. 1).

Табл. 1 Зависимость необходимого количества элементов в АР от толщины ОК.

Количество элементов антенной решётки	32	45	70
Толщина объекта контроля, мм	18	30	70

Использование при оценке эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  не только акустической схемы **TBT(SS)**, но и схему **TBTBT(SSSS)**, повышает точность сходимости решения.

## 2.2. Описание алгоритма расчёта

На Рис. 4 представлена структурная схема алгоритма, описывающая предлагаемый метод определения скорости звука и толщины объекта контроля.

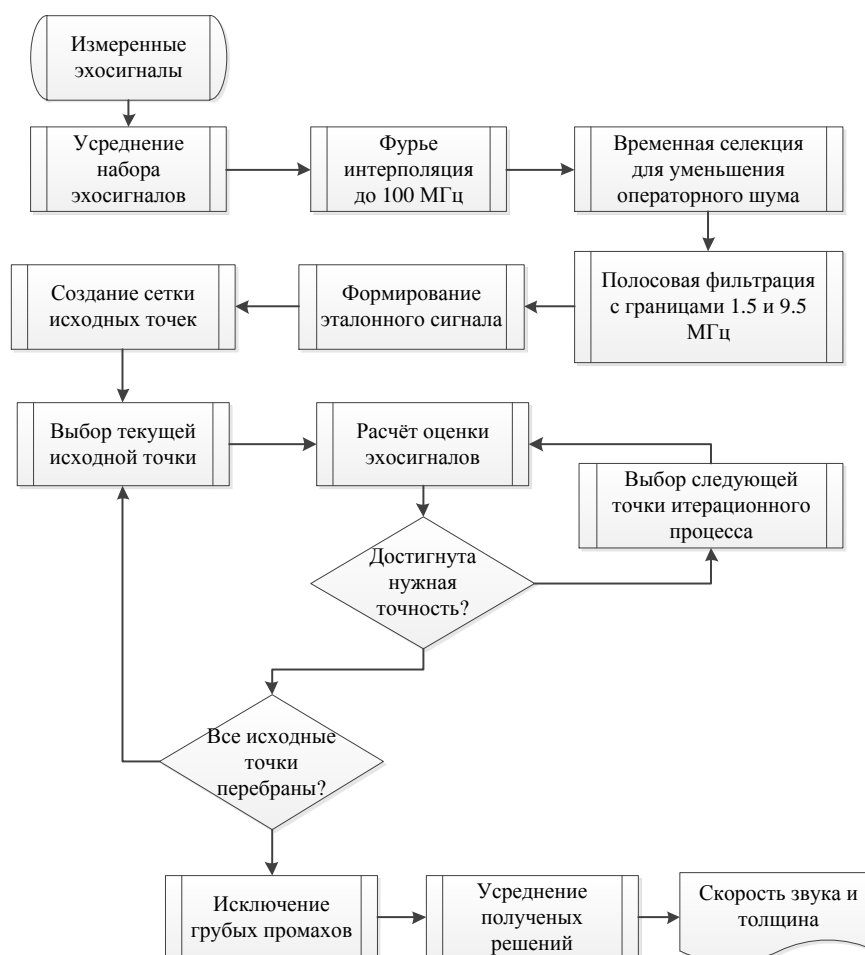


Рис. 4 Структурная схема алгоритма.

Рассмотрим вкратце каждый из этапов работы алгоритма.

- **Усреднение набора эхосигналов.** На первом этапе для повышения отношения сигнал/шум происходит усреднение при измерении эхосигналов  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ .
- **Интерполяция.** Так как возможности используемой аппаратуры не позволили на желаемой временной апертуре производить регистрацию эхосигналов с частотой дискретизации больше 25 МГц, то следующим шагом в обработке идет Фурье-интерполяция эхосигналов до частоты 100 МГц [16].
- **Временная селекция.** С целью снижения уровня операторного шума проводится временная селекция тех временных областей, в которые попадают эхосигналы по выбранным акустическим схемам.
- **Полосовая фильтрация.** Для уменьшения уровня шума эхосигналы пропускаются через полосовой фильтр с граничными частотами 1.5 и 9.5 МГц.
- **Формирование эталонного сигнала.** Эталонный сигнал  $s(t)$ , который используется в формуле (3), формируется следующим образом. Все импульсы для заданной акустической схеме, сдвигаются так, чтобы их максимальные значения, совпадали по времени. Далее из получившегося массива вдоль оси  $x$  берется медиана, которая и будет служить эталонным сигналом  $s(t)$ . На Рис. 5 слева показан вид эхосигналов после выравнивания, а справа сплошной линией показан эталонный эхосигнал  $s(t)$  после вычисления медианы. Пунктирной линией показан один из эхосигналов, амплитуду которого при расчёте  $s(t)$  удалось уменьшить практически до нуля.

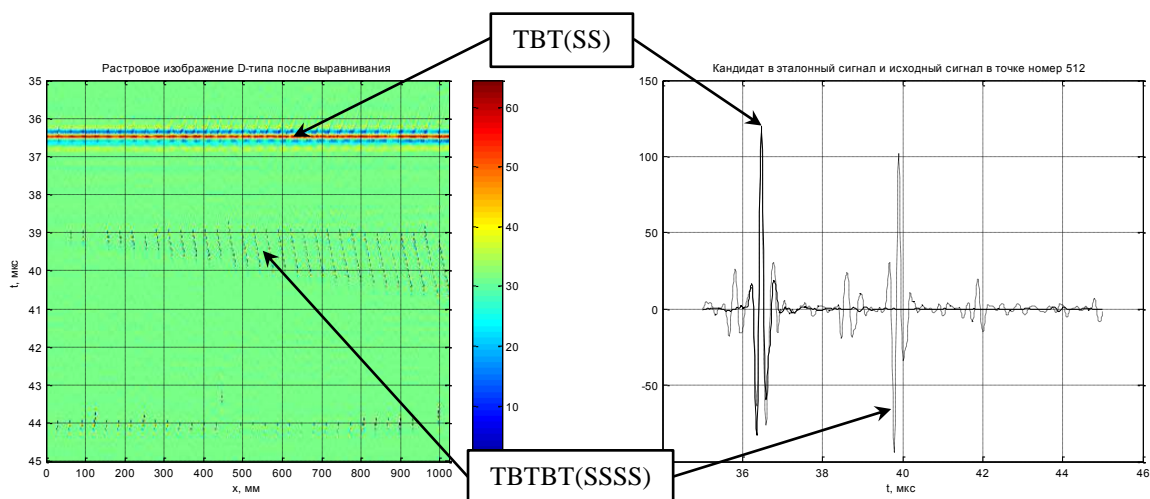


Рис. 5 Вид эхосигналов после выравнивания (слева) и вид эталонного эхосигнала (сплошная линия) определённого по акустической схеме **TBT(SS)**.

- **Выбор сетки исходных точек.** Перед началом расчета оценки  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  необходимо выбрать множество начальных точек  $\{\nu_s\}$  метода Нелдера-Мида для поиска минимума

функции  $D(v; a, a_\epsilon)$ . Значения выбираются на прямоугольной сетке вблизи предполагаемого решения.

- **Расчет оценки эхосигналов.** Из множества начальных точек  $\{v_s\}$  выбирается очередная и используется в качестве начального значения метода Нелдера-Мида.
- **Проверка достижения минимума.** После каждой итерации полученное значение  $D(v; a, a_\epsilon)$  сравнивается с предыдущим и делается прогноз изменения текущего вектора  $v$ . Процесс прекращается в тот момент, когда предыдущее значение  $D(v; a, a_\epsilon)$  будет отличаться от посчитанного на величину меньше установленного порога точности. Значение  $\hat{v}$  доставляющее минимум  $D(v; a, a_\epsilon)$  и будет решением.

### 3. Факторы, влияющие на точность измерений

Важнейшей характеристикой любой измерительной системы является точность измерения значений физических величин, определяемая сравнением результата измерения с истинным или действительным (условно истинным) значением. Точность расчёта предложенного алгоритма определяется, в частности, точностью задания параметров элементов измерительной системы. К таким параметрам можно отнести геометрические и акустические свойства призмы и антенных решёток, частоту дискретизации сигналов в дефектоскопе, а также степень параллельности границ объекта контроля (Рис. 6). Для предлагаемого алгоритма был проведен анализ параметров влияющих на точность вычисления  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; v)$ .

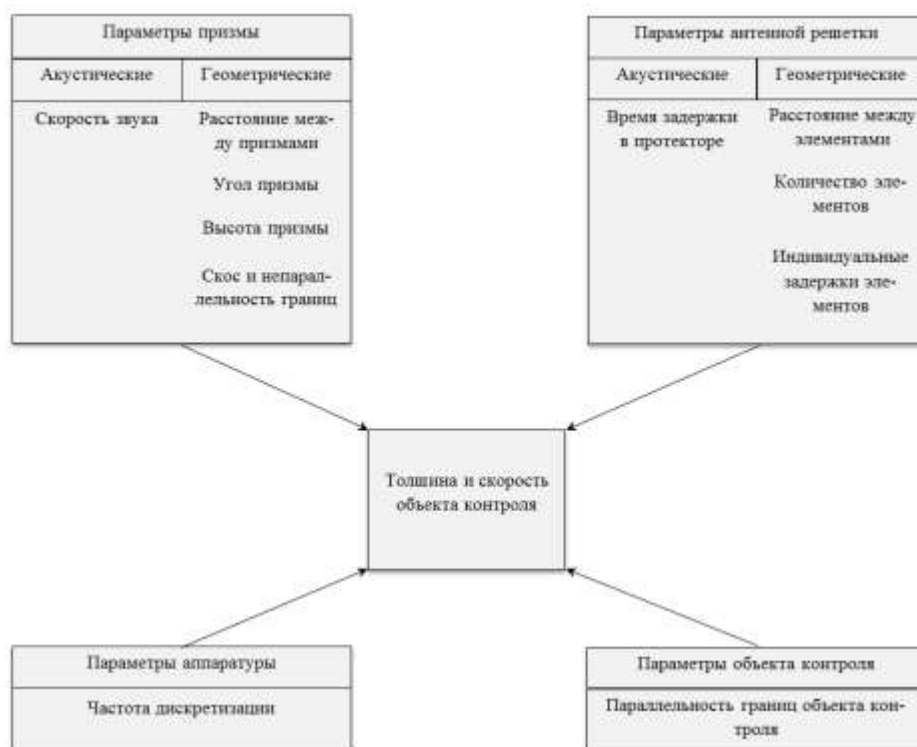


Рис. 6 Структурный вид параметров влияющих на точность вычисления.

Отклонение от номинального значения каждого из этих параметров приводит к погрешности в итоговом результате. Для каждого из этих параметров было определено влияние на точность вычислений. Не приводя всех результатов расчёта погрешностей по каждому из параметров отметим, что самым критическим оказался угол наклона призмы. Точность в задании угла наклона призмы, которую дает производитель, слишком грубая, поэтому перед проведением измерений следует уточнить значение угла. Остальные параметры, значения которых гарантируются производителем в некоторых пределах, не вносят существенный вклад в итоговый результат и не выводят его за пределы точности 0.5%.

Отметим, что, не смотря на весьма продвинутую технологию изготовления антенных решёток, время пробега импульса по протектору для элементов разные. Причем эта разница достигает нескольких десятков наносекунд, что может составлять заметную величину от центральной частоты  $T_c$  антенной решётки. Скорость в призме согласно паспорту изготовителя указывается с точностью 0.5%. Учитывая, что импульс может пробегать в объекте контроля расстояния соизмеримое с расстоянием пробега в призме, то для повышения точности работы алгоритма нужно провести измерения продольной скорости звука в призмах и использовать их, а не паспортное значение.

## 4. Численные эксперименты

Перед проведением экспериментов на реальных образцах для проверки правильности работы предложенного алгоритма были выполнены численные эксперименты. Была построена модель, состоящая из объекта контроля и двух антенных решёток на призмах (Рис. 1). По формуле (3) рассчитывались эхосигналы, эмулирующие экспериментальные данные для скорости звука и толщины объекта контроля равных 3.23 мм/мкс и 30.0 мм соответственно. Этот набор эхосигналов рассматривался как «измеренный» и служил входными данными для алгоритма, описанного в разделе 2. Естественно, что в этом численном эксперименте операторный шум отсутствовал.

На Рис. 7 в виде начальной точки и найденного решения показан результат работы алгоритма для случая дискретизации 25 и 50 МГц. Окружностями красного цвета отмечены девять исходных точек множества  $\{v_s\}$ , а окружностями зелёного отмечены полученные решения  $\{\hat{v}\}$ . Красной звездочкой отмечено решение определённое как среднее значение  $\langle \hat{v} \rangle$ . Видно, что область сходимости (овал жёлтого цвета в которой заключены все решения) при частоте 50 МГц примерно в два раза меньше, нежели при 25 МГц.

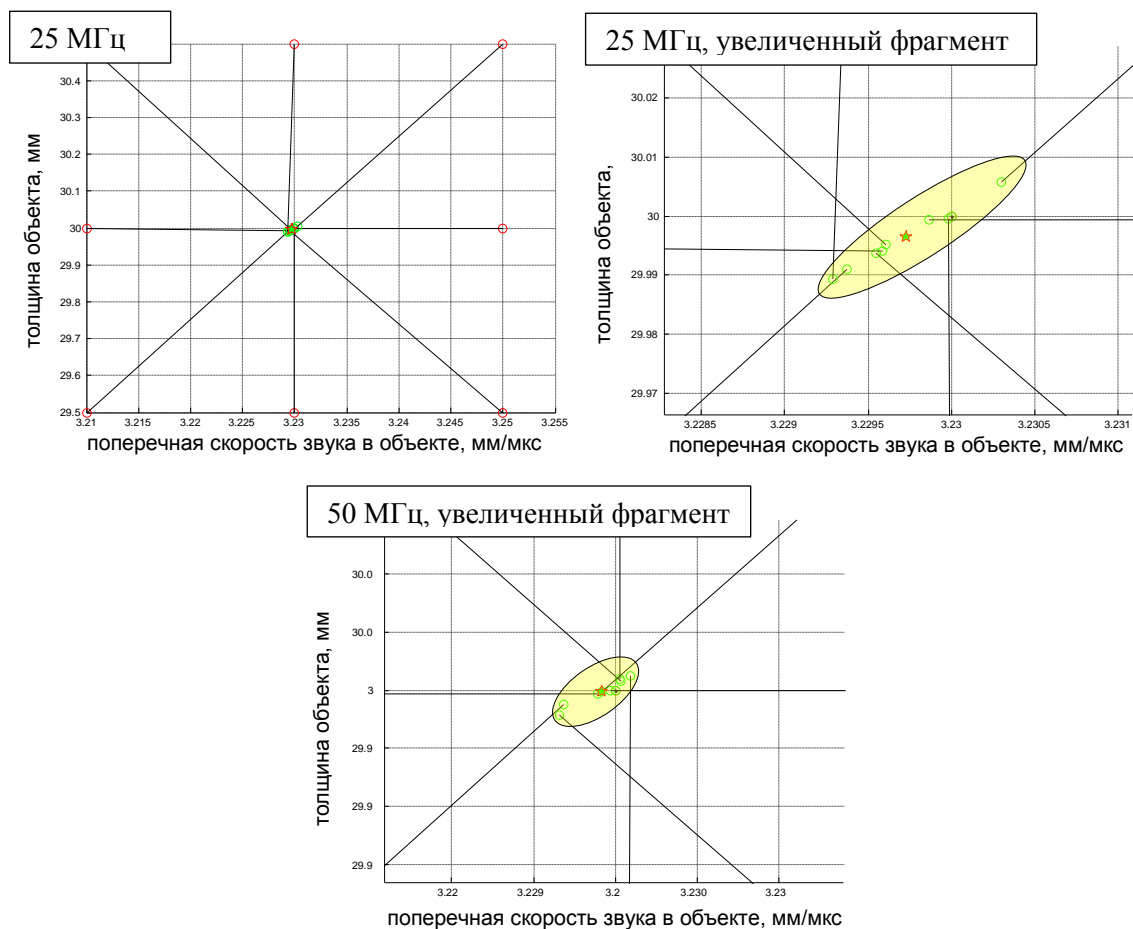


Рис. 7 Область сходимости решений при различных дискретизации 25 и 50 МГц.

В Табл. 2 приведены результаты численных экспериментов. Относительная погрешность измерений  $\delta$  даже в самом худшем случае – при определении толщины, при частоте дискретизации 25 МГц, – с избытком обеспечивает требуемую точность. Двукратное увеличение частоты дискретизации эхосигналов уменьшает примерно в два раза относительные погрешности измерений скорости и толщины.

Табл. 2 Результаты численных экспериментов.

	25 МГц			50 МГц			Точное решение
		$\sigma$	$\delta, \%$		$\sigma$	$\delta, \%$	
$c_s$ , мм/мкс	3.22973	$6.0 \cdot 10^{-05}$	$1.89 \cdot 10^{-03}$	3.22992	$3.0 \cdot 10^{-05}$	$8.8 \cdot 10^{-04}$	3.23
$h$ , мм	29.99643	$1.71 \cdot 10^{-03}$	$5.71 \cdot 10^{-03}$	29.99981	$7.1 \cdot 10^{-04}$	$2.37 \cdot 10^{-03}$	30.0

## 5. Модельные эксперименты

Для проверки метода на реальных образцах использовалось два стандартных образца типа СО-2, СО-3 и образец Тт-Б-18-Тр №0901 толщиной 18 мм. Все образцы были изготовлены из стали марки 20.

### 5.1. Контрольные измерения

На всех образцах были произведены измерения толщины  $h$  и скорости поперечной волны  $c_s$ . Толщина образцов измерялась с помощью электронного штангенциркуля с абсолютной погрешностью измерений 0.05 мм, что для образца толщиной 18 мм обеспечивает относительную погрешность не менее 0.3%. Для образцов с большей толщиной точность измерения будет только лучше. Измерения скорости поперечной волны эхометодом проводились с помощью ультразвукового прибора для измерения механических напряжений ИН-5101А разработанный ООО «ИНКОТЕС» [17]. Данный прибор позволяет измерять временные задержки эхоимпульсов с абсолютной погрешностью  $\pm 5$  нс. Определение временных задержек происходит в автоматическом режиме с помощью специализированного программного обеспечения. По правилу определения относительной погрешности результата деления двух случайных величин [18], то есть толщины на время пробега, точность измерений поперечной скорости звука можно оценить как 0.17%. Значения измеренных скоростей поперечных волн и толщин для всех образцов приведены в Табл. 3.

Табл. 3 Толщина и акустические параметры образцов.

Наименование образца	Скорость поперечной	Толщина, мм
----------------------	---------------------	-------------



	ВОЛНЫ, ММ/МКС	
СО-2	$3,229 \pm 0,006$	$29,9 \pm 0,05$
СО-3	$3,232 \pm 0,006$	$29,9 \pm 0,05$
Тт-Б-18-Тр №0901	$3,228 \pm 0,006$	$18,0 \pm 0,05$

## 5.2. Результаты измерений двумя антенными решётками

Для проведения экспериментов использовался 32-ух разрядный ФАР-дефектоскоп «Х-32» со специальной настройкой позволяющей проводить измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования при излучении одной антенной решёткой и приёмом другой (Рис. 1). Антенные решётки типа РЕ-5.0М32Е0.8Р были установлены на 35-ти градусные призмы из рексолита типа Т1-35WОR-1. Между антенными решётками и призмами в качестве контактной жидкости использовался глицерин, а между призмами и образцами в качестве контактной жидкости использовалось машинное масло.

Как упоминалось выше, для поиска решения нужно задать множество начальных значений  $\nu = \{c_s, h\}$  для программы поиска минимума функции  $D(\nu; a, a_e)$ . На Рис. 8 приведены примеры поиска такого решения для образца Тт-Б-18-Тр №0901 толщиной 18 мм. На рисунке окружностями красного цвета обозначены двадцать пять начальных значений  $\{v_s\}$ , а окружностями зелёного цвета – найденные решения  $\{\hat{\nu}\}$ . Красной звездочкой отмечено решение определённое как среднее значение  $\langle \hat{\nu} \rangle$  всех решений. При определении множества начальных значений  $\nu = \{c_s, h\}$  для образца Тт-Б-18-Тр №0901 была ошибочно выбрана скорость звука для дюралюминия, а толщина образца полагалась равной 16 мм, а не 18 мм. Поэтому часть решений «пришли» в область локального минимума, отмеченная овалом красного цвета. Но решения, стартовавшие из 18 начальных точек, оказались в области с глобальным минимумом функции  $D(\nu; a, a_e)$ , отмеченной на Рис. 8 (слева) жёлтым овалом. Поэтому решение, найденное как среднее  $\langle v_s \rangle$ , оказалось очень сильно смещённым от правильного решения (см. Табл. 3). Но даже в том случае, когда массив исходных точек  $\{v_s\}$  (Рис. 8, справа) был выбран правильно, часть решений не попало в глобальный минимум, и среднее  $\langle v_s \rangle$  снова оказалось недопустимо далеко от правильного решения.

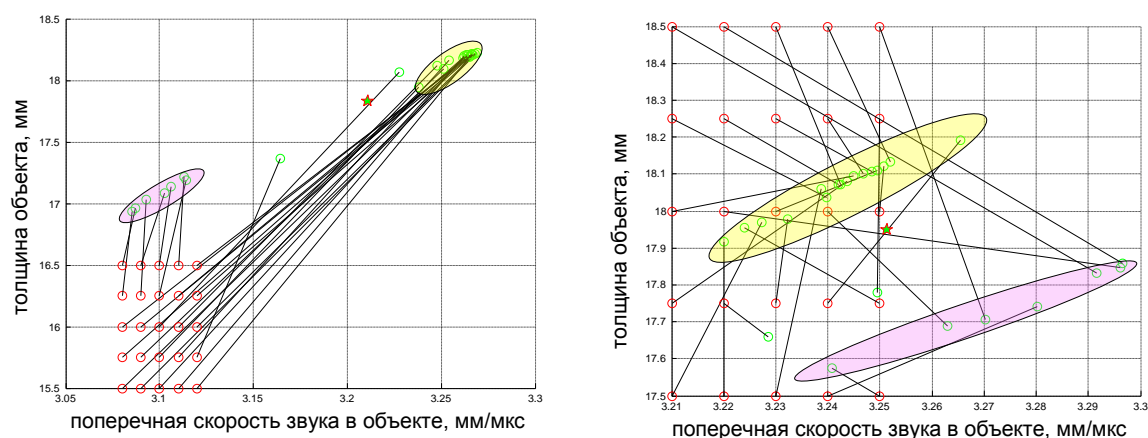


Рис. 8 Примеры поиска решений для образца Тт-Б-18-Тр №0901.

Поэтому перед проведением операции усреднения массив полученных решений  $\{\hat{\nu}\}$  нужно проанализировать и, после сравнения значений функции  $D(\nu; a, a_\epsilon)$  для каждого найденного решения и после статистического выявления грубых промахов по уровню значимости  $q = 0.05$  [18], удалить «ошибочные значения». Только после этого можно определять решение как среднее значение.

С помощью аппаратуры описанной выше были проведены измерения эхосигналов и обработка их по предложенному алгоритму. В Табл. 4 приведены результаты расчёта при оценке эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  только по акустической схеме **ТВТ(SS)**.

Табл. 4 Результаты проведения расчетов по схеме **ТВТ(SS)**.

Образец	Скорость поперечной волны, мм/мкс			Толщина, мм		
	Измерения	Расчёт	$\delta_c$	Измерения	Расчёт	$\delta_h$
Сталь, 30 мм (СО-2)	3,231	3.242	-0,34%	29.9	30.46	1,87%
Сталь, 30 мм (СО-3)	3,234	3.247	-0,40%	29.9	30.67	2,58%
Сталь, 18 мм (Тт-Б-18)	3,236	3.234	0,06%	18.0	18.51	2,72%

По этим результатам можно сделать вывод о том, что, используя только одну акустическую схему, удастся получить значения скорости поперечных волн с относительной погрешностью меньше чем 0.5%, а толщины с погрешностью больше 1.8%. Это ниже заявленной точности.

Для повышения точности расчетов, измеренные эхосигналы, обрабатывались при расчёте оценки эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$  для двух акустических схем: **ТВТ(SS)** и **ТВТВТ(SSSS)**. В Табл. 5 приведены результаты расчетов.

Табл. 5 Результаты проведения расчётов по схеме **TBT(SS)** и **TBTBT(SSSS)**.

Образец	Скорость поперечной волны, мм/мкс			Толщина, мм		
	Измерения	Расчёт	$\delta_c$	Измерения	Расчёт	$\delta_h$
Сталь, 30 (СО-2)	3,231	3,234	-0,09%	29.9	29.93	0,10%
Сталь, 30 мм (СО-3)	3,234	3,241	-0,22%	29.9	30.01	0,37%
Сталь, 18 мм (Тт-Б-18)	3,236	3,242	0,28%	18.0	17.98	0,22%

По результатам этих расчётов можно сделать вывод о том, что добавление второй акустической схемы **TBTBT(SSSS)** при вычислении функции  $D(v; a, a_e)$  приводит к более точным решениям, как для скорости поперечных волн ( $\delta_c < 0.5\%$ ), так и для толщины ( $\delta_h < 0.5\%$ ).

Следует упомянуть, что для измерений эхосигналов использовались призмы, постоянно используемые для эксплуатационного контроля, и их размеры и, особенно, угол наклона из-за стирания могли отличаться от паспортных данных, которые использовались при расчётах. Очень важным является и то обстоятельство, что, ни в паспорте на антенную решётку, ни у фирмы-изготовителя, не удалось узнать толщину протектора и скорость звука в нём. Поэтому при расчётах был введён третий параметр – время пробега в призме  $t_p$ , по которому тоже проводилась оптимизация. С одной стороны, это увеличило время расчётов. С другой стороны, переведя задачу оптимизации из двумерного в трёхмерный вариант, удалось двумерные локальные минимумы превратить в особенности типа «седло», в которых решения не «застевали». Обычно значение  $t_p$  получалось около 200 нс.

## 6. Выводы

Представлен метод, позволяющий с точностью не менее чем 0.5% определять неизвестную поперечную скорость звука и неизвестную толщину объекта контроля с плоскопараллельными границами. Проанализированы факторы, влияющие на точность определения толщины и скорости звука.

Проверка работы предложенного алгоритма на трёх образцах подтвердила заявленную точность измерений скорости поперечной волны и толщины.

Так как метод (5) по сути своей является интерференционным, то в перспективе следует рассчитывать на достижение точности измерений не менее 0.1%. Такая погрешность и измерение скорости продольной волны позволит вплотную подойти к задаче оценки напряжённно-деформируемого состояния.

Дальнейшее развитие предложенного метода может позволить перейти к решению обратной задачи рефракции, да ещё с условием неровного дна объекта контроля.

Авторы выражают свою признательность Сергею Георгиевичу Копытов генеральному директору НУЦ «Качество» за предоставленную возможность провести измерения скорости поперечной ультразвуковой волны в образцах с помощью прибора ИН-5101А.

## 7. Список литературы

---

- 1 Неразрушающий контроль. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- 2 Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка. 1977. – 152 с.
- 3 Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин. – Вестник научно-технического развития, № 4 (32), 2010, с. 18-28.
- 4 Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов : производств.-практ. изд. / В. Г. Бадалян [и др.]; под ред. А. Х. Вopilкина. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.
- 5 Базулин Е.Г., Получение изображений дефектов когерентными методами с учетом многократного отражения от плоскопараллельных границ объектов контроля при ультразвуковом контроле. – Дефектоскопия, 2007, №7, с. 48-70
- 6 Карпельсон А.Е., Аристов В.В., Гусев Е.А. Возможности ультразвуковой реконструктивной томографии. – Дефектоскопия, 1990, №6, с. 3-18.
- 7 ФАР-дефектоскоп «**X-32**», <http://www.harfang.ru/content/x-32.html>
- 8 ФАР-дефектоскоп «**OMNISCAN MX**», <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx/>
- 9 ФАР-дефектоскоп «**ISONIC 2009**», <http://www.sonotronndt.com/i2009.htm>
- 10 Данилов В.Н., Самокрутов А.А., Люткевич А.М. Теоретические и экспериментальные исследования малоапертурных прямоугольных преобразователей. – Контроль, Диагностика, 2003, № 7, с. 29-33.
- 11 Базулин Е.Г., Голубев А.С., Коколев С.А. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов. - Дефектоскопия, 2009, № 2, с. 18-32.
- 12 Holmes, C., Drinkwater, B.W. and Wilcox, P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. - NDT&E International, 2005, vol. 38, p. 701-711.
- 13 Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. – 720 с.
14. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надёжности. – М.: Советское радио, 1962. – 553 с.
- 15 Мэтьюс Д. Г., Финк К. Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
- 16 Самарский А.А. Введение в численные методы. Издатель: М: Наука. 1989. – 432.

---

17 Ультразвуковой прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А,  
<http://www.encotes.ru/?q=node/25>

18 Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970.