# БЕЗЭТАЛОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ И СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ВОЛНЫ В НЕМ ПО ЭХОСИГНАЛАМ, ИЗМЕРЕННЫМ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

### © 2019 г. Е.Г. Базулин<sup>1,\*</sup>, А.Х. Вопилкин<sup>1</sup>

### ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино» \*E-mail: bazulin@echoplus.ru

### Поступила в редакцию 11.03.2019; после доработки 17.04.2019 Принята к публикации 26.04.2019

Предложен безэталонный метод определения скорости продольной и поперечной вертикально поляризованной волны и толщины объекта контроля, основанный на сравнении измеренных и рассчитанных эхосигналов, отраженных от границ объекта контроля при использовании антенной решетки на призме с нулевым углом наклона, работающей в режиме двойного сканирования. Приведены результаты численных и модельных экспериментов, подтвердившие работоспособность предложенного метода. С его помощью в модельном эксперименте удалось измерить толщину объекта контроля и скорость продольной и поперечной волны в нем с относительной погрешностью (точностью) около 0,25 %. Предложенный метод может быть использован для измерения анизотропных свойств объекта контроля, что может дать информацию о его физико-механических свойствах.

*Ключевые слова*: безэталонные измерения, антенная решетка, двойное сканирование, Full Matrix Capture (FMC), целевая функция.

DOI: 10.1134/S0130308219060058

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В практике ультразвукового контроля (УЗК) часто возникают задачи по измерению толщины объекта контроля и скорости продольной или/и поперечной волны в нем. Для определения в объекте контроля мест наибольшего локального утонения применяют ультразвуковые толщиномеры [1]. Прецизионные измерения скорости звука позволяют определить физико-механические свойств объекта контроля. 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 различной поляризации и механическим напряжением. Нелинейный характер этой зависимости делает ее весьма слабой. Поэтому, для определения напряжения в конструкционном материале с погрешностью менее 10 % от предела текучести, относительная погрешность измерения скоростей ультразвуковых волн должна быть равна 0,1—0,01 % [3, 4].

Еще один важный раздел УЗК — это решение задачи дефектометрии за счет анализа высококачественного изображения отражателя для определения его типа, размера и места расположения [5]. Для восстановления высококачественного изображения отражателей применяют метод цифровой фокусировки антенной решетки (ЦФА) [6], учитывающий такие эффекты, как многократное отражение ультразвукового пучка от неровных границ объекта контроля с учетом трансформации типа волны. Однако без знания геометрических и акустических свойств объекта контроля (скорости звука продольной и/или поперечной волны) с относительной погрешностью (точностью) порядка 0,5 % получить высококачественное изображение несплошности с учетом отражения импульсов от границ объекта контроля крайне сложно.

Основным способом измерения скорости звука является эхометод, позволяющий по известной толщине и измеренному временному интервалу между донными сигналами рассчитать скорость волны в объекте контроля. Для этих целей разработаны специальные пьезо- и ЭМА-преобразователи для излучения и приема продольной или поперечных волн вертикальной и горизонтальной поляризаций [7]. В [8] для определения скорости продольной и поперечной волны в объекте контроля с известной толщиной было предложено использовать импульсы, отраженные с трансформацией типа волны от дна образца при использовании одноэлементного пьезопреобразователя. В статье не приведена оценка точности предлагаемого метода, которая из-за малых амплитуд трансформированных эхосигналов и изменении их формы, может оказаться около 0,5—1,0 %.

Так как при УЗК точная информации о толщине объекта контроля, как правило, отсутствует, и нет возможности провести ее измерения из-за одностороннего доступа, то перспективным подходом к решению проблемы являются безэталонные методы определения толщины объекта контроля и скорости звука. В бетонных конструкциях скорость звука может изменяться не на проценты, а на десятки процентов от номинального значения. Поэтому для восстановления высококачественного изображения отражателей в изделиях из бетона был разработан безэталонный метод определения скорости продольной волны и толщины объекта контроля [9]. В патенте [10] был предложен способ определения толщины слоев в многослойном объекте и скоростей в них по эхосигналам, измеренным двумя разнесенными преобразователями. В [11] для безэталонного определения скорости звука и толщины объекта контроля был предложен метод, который заключается в сравнении эхосигналов, измеренных с помощью двух антенных решеток, с оценкой эхосигналов, расчет которых проводится для заданных значений скорости продольной или поперечной волны и толщины объекта контроля. Решением задачи являются значения скорости звука и толщины, которые обеспечивают минимальную разницу между рассчитанными и измеренными эхосигналами. Использование двух антенных решеток на призмах обусловлено тем, что сварное соединение реального объекта контроля может иметь валик усиления, что не позволит провести измерения одной антенной решеткой.

В статье предлагается безэталонный метод измерения толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами и скорости продольной и поперечной вертикально поляризованной волны в нем с точностью не менее 0,5 % по эхосигналам, измеренным одной антенной решеткой, работающей в режиме двойного сканирования. Важным обстоятельством является то, что измерение эхосигналов можно провести не на специальной аппаратуре, а с помощью обычного ЦФАдефектоскопа, с последующей математической обработкой эхосигналов.

### 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

На рис. 1 схематически показана антенная решетка из  $N_e$  элементов на призме с нулевым углом наклона, которая установлена на образец с плоскопараллельными границами. На рисунке схематически показаны три возможных пути распространения импульса при излучении первым элементом антенной решетки. Описание траектории распространения импульса с учетом трансформации типа волны при отражении его от границ объекта контроля будем называть акустической схемой *as*. Тип волны между касаниями импульса границ будем обозначать буквами L (продольная) или T (поперечная вертикальной поляризации). На рис. 1 зелеными линиями показаны участки траектории, по которыми распространяется продольная волна L, а красными — поперечная T. Список акустических схем, которые описывают три показанных на рис. 1 траектории, можно записать как  $\{as\} = LL, LT, LLLT$ .



Рис. 1. Схема проведения измерений эхосигналов.

Эхосигналы, излученные первым элементом антенной решетки и измеренные всеми элементами, называются первым выстрелом. Множество эхосигналов всех выстрелов называются залпом. Такой способ регистрации эхосигналов называется двойным сканированием [5], а в зарубежной литературе — Full Matrix Capture (FMC). Скорость продольной, поперечной вертикально поляризованной волны и плотность в призме обозначены как { $c_{w,p}, c_{w,t}, \rho_w$ }. Аналогичные параметры образца обозначены как { $c_p, c_p, \rho$ }. Положение элемента, излучающей решетки характеризуется вектором  $\mathbf{r}_t$ , а приемной —  $\mathbf{r}_r$ . Измеренные антенной решеткой в режиме двойного сканирования эхосигналы  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$  сравниваются с эхосигналами  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ , которые рассчитываются для заданных скоростей волн двух типов в образце и его толщины  $\mathbf{v} = \{c_l, c_t, h\}$ . Решением задачи является то значение  $\mathbf{v}$ , при котором достигается наименьшее отличие между  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ , то есть задача сводится к поиску минимума целевой функции  $D(\mathbf{v})$ , характеризующей степень близости измеренных и рассчитанных эхосигналов

$$\hat{\mathbf{v}} = \operatorname*{arg\,min}_{\cdot} D(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t), \hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})). \tag{1}$$

### 2.1. Выбор вида целевой функции

Эффективность метода определения скоростей в объекте контроля и его толщины определяется видом целевой функции, по которой определяется степень близости измеренных  $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$  и рассчитанных эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ . Идеальная целевая функция имеет только один минимум с монотонным спуском, крутизна которого возрастает, при приближении к минимуму.

Для оценки близости двух функций можно использовать целевую функцию  $D_m(\mathbf{v}; a, a_{\varepsilon})$  следующего вида:

$$D_{m}(\mathbf{v};a,a_{\mathfrak{E}}) = a \cdot \left\| \hat{p}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;\mathbf{v}) - p(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t) \right\| + a_{\mathfrak{E}} \cdot \left\| \mathfrak{E}(\hat{p}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;\mathbf{v})) - \mathfrak{E}(p(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t)) \right\|,$$
(2)

где  $\mathfrak{E}$  — оператор расчета огибающей сигнала,  $\|\|\|$  — обозначает Евклидову норму вектора, а  $\mathbf{v} = \{c_l, c_t, h\}$ . Первый член целевой функции имеет вес *a* и определяет разницу между радиосигналами, а второй имеет вес  $a_{\mathfrak{E}}$  и описывает разницу между огибающими радиосигналов.

В качестве целевой функции  $D_c(\mathbf{v})$  можно использовать обратную функцию корреляции

$$D_{c}(\mathbf{v}) = \frac{1}{\left| \iiint p(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t) \hat{p}^{*}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;\mathbf{v}) dt d\mathbf{r}_{t} d\mathbf{r}_{r} \right|},$$
(3)

где значок \* означает операцию комплексного сопряжения. На вид целевой функции влияют такие параметры, как форма излучающего сигнала s(t), операторный шум, то есть точность модели, используемой для расчета эхосигналов, угловая апертура антенной решетки, частота дискретизации сигнала и количество акустических схем, используемых при оценке эхосигналов.

В отсутствии шумов целевая функция  $D_m(\mathbf{v}; a, a_{\varepsilon})$  при  $a = 0, 5; a_{\varepsilon} = 1$  имеет «овражистый» вид с одним минимумом, равным нулю, с довольно крутым спуском. Наличие шума приводит к появлению ложных импульсов, не предусмотренных моделью рассеивания (см. рис. 2), к искажению формы эхосигналов и их амплитуд (см. рис. 2 и рис. 3). В результате целевая функция будет иметь множество локальных минимумов, а глобальный минимум перестанет быть равным нулю. Это затрудняет эффективное использование целевой функции  $D_m(\mathbf{v}; a, a_{\varepsilon})$ . Целевая функция  $D_c(\mathbf{v})$  в отсутствии шумов имеет глобальный минимум отличный от нуля и «овражистый» вид с не таким крутым спуском как у  $D_m(\mathbf{v}; a, a_{\varepsilon})$ . Однако при наличии шума, как показал опыт использования функции  $D_c(\mathbf{v})$ , она, из-за своего мультипликативного характера, оказалась более устойчивой к ошибкам расчета амплитуд импульсов.

Понятно, что точность расчета скорости продольной и поперечной волны и толщины объекта контроля, зависит от точности расчета оценки эхосигналов — чем точнее удается рассчитать эхосигналы  $\hat{p}(\mathbf{r}_{r},\mathbf{r}_{r},t;\mathbf{v})$ , тем круче стенки у целевой функции и тем увереннее находится минимум целевой функции.

#### 2.2. Расчет поля, измеренного антенной решеткой

Расчет поля, измеренного антенной решеткой, с учетом того, что отражение волны происходит на плоских границах однородного объекта контроля, с высокой степенью точности можно выполнить с помощью метода лучевых трубок [12]. Траектория распространения импульсов описывается в виде последовательности векторов  $\{\mathbf{r}\} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{m+3}\}$ , где m — число отражений от границ. Если m = 1, то импульс один раз отражается от дна. Скорость распространения звука вдоль траектории,

42

описывается списком —  $\{c\} = \{c_1, c_2, \dots c_{m+3}\}$ . Первым и последним в списке указывается скорость звука в призме антенной решетки. Через  $\{\alpha\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_{m+4}\}$  обозначим список углов падения луча на границы объекта контроля (см. рис. 1). Углы  $\alpha_1$ и  $\alpha_{m+4}$  — это углы луча к нормали излучающего и приемного элемента антенной решетки. Вид измеренных эхосигналов, излученных элементом антенной решетки в точке **r**, а принятых элементом в точке **r**, можно рассчитать по формулам:

$$\hat{p}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r},t;\mathbf{v}) = \sum_{\{as\}}^{M} A_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r})s(t-t_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r})),$$

$$t_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r}) = \sum_{n=1}^{m+1} \frac{|\mathbf{r}_{n}|}{c_{n}}, A_{as}(\mathbf{r}_{t},\mathbf{r}_{r}) = \frac{B(\alpha_{1})D_{w,obj}(\alpha_{2})\left(\prod_{n=3}^{m+2}T(\alpha_{n})\right)D_{obj,w}(\alpha_{m+3})B(\alpha_{m+4})}{R(\{\mathbf{r}\},\{c\})},$$
(4)

где **v** — список параметров, которые влияют на расчет оценки эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_{t}, \mathbf{r}_{r}, t; \mathbf{v})$ ; s(t) — вид излученного сигнала; {*as*} — список используемых акустических схем;  $T(\alpha_{m})$  — коэффициент отражения от границ объекта контроля для разных типов волн;  $R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})$  — функция, определяющая амплитуду импульса;  $t_{as}(\mathbf{r}_{t}, \mathbf{r}_{r})$  — время пробега импульса по траектории {**r**} акустической схемы *as*;  $D_{w,obj}(\alpha_{2})$ ,  $D_{obj,w}(\alpha_{m+3})$  — коэффициенты прохождения из призмы в объект контроля и обратно,  $B(\alpha_{1})$ ,  $B(\alpha_{m+4})$  — диаграммы направленности при излучении и приеме, зависящие от размеров элемента антенной решетки. Формулы для расчета коэффициентов отражения и преломления на плоской границе однородных изотропных упругих сред приведены, например, в монографиях [13, 14]. Для определения траекторий {**r**}, необходимых для расчета эхосигналов по формуле (4), можно воспользоваться принципом Ферма [15], который позволяет учитывать многократное отражение от границ образца с учетом эффекта трансформации типа волны.

На рис. 2*а* показано растровое изображение экспериментально измеренных эхосигналов семнадцатого выстрела. Условия проведения эксперимента описаны в разделе 5. Выноски красного цвета указывают на эхосигналы разных акустических схем. На рис. 2*6* приведены изображения эхосигналов семнадцатого выстрела, рассчитанные по формуле (4).



Рис. 2. Растровое изображение эхосигналов семнадцатого выстрела, измеренных экспериментально (*a*) и рассчитанные по формуле (4) (*б*).

На рис. За показан эхосигнал номер один семнадцатого выстрела, измеренный экспериментально (график черного цвета) и рассчитанный по формуле (4) (график красного цвета). На рис. Зб показаны эхосигналы номер двадцать девять семнадцатого выстрела. Видно хорошие совпадение времен задержек импульсов, но совпадение формы и амплитуды импульсов далеко не идеальное. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, на экспериментальных эхосигналах присутствует множество реверберационных импульсов и импульсов более сложной природы, чем описывает формула (4). Во-вторых, форма излученного импульсов более сложной природы, чем описывает формула (4). Во-вторых, форма излученного импульсов *s*(*t*) точно не известна. В-третьих, в формуле (4) интегрирование по поверхности излучающего и приемного элемента антенной решетки заменено на излучение и прием точечным элементом с диаграммой направленности  $B(\alpha)$ . Такое упрощение расчетов не позволяет учитывать эффект изменения формы эхосигнала при отклонении луча от акустической оси элемента антенной решетки.



Рис. 3. Эхосигналы номер один (а) и двадцать девять (б) семнадцатого выстрела.

### 2.3. Выбор акустических схем

Пусть на поверхности объекта толщиной  $h_0$  размещены приемник и излучатель на расстоянии *d* друг от друга. Если луч падает на дно объекта под углом  $\alpha_{0,1}$  со скоростью распространения импульса  $c_{0,1}$ , а отражается под углом  $\alpha_{0,2}$  со скоростью  $c_{0,2}$ , то время пробега импульса, с учетом закона Снеллиуса, можно рассчитать по формуле

$$t_0 = \frac{\sqrt{h_0^2 + x^2}}{c_{0,1}} + \frac{\sqrt{h_0^2 + (d - x)^2}}{c_{0,2}}, x = \frac{d}{c_{0,1}/c_{0,2} + 1},$$
(5)

где *x* — координата точки отражения луча от дна. Для случая  $c_{0,1} = c_{0,2}$  получается тривиальный результат x = d/2. При d = 0, то есть когда излучатель и приемник совпадают, для произвольно выбранной скорости  $c_1$  время прихода импульса  $t_1$  будет совпадать с  $t_0$  при толщине  $h_1 = \frac{t_0 c_1}{2}$ , и решить задачу определения и скорости звука, и толщины объекта становится невозможным, так как целевая функция (2) или (3) примет вид «траншеи».

На рис. 4 линией зеленого цвета показан график между временем прихода  $t_0$  импульса для скоростей (5,9, 5,9) мм/мкс, толщины 6 мм и временем прихода  $t_1$  импульса для скоростей (5,91, 5,91) мм/мкс и толщины 6,03 мм. Видно, что для антенной решетки размерами 32 мм разница времен приходов  $\Delta t_{01} = t_0 - t_1$  в размахе составляет величину около 13 нс, что меньше шага дискретизации при частоте 50 МГц. Наличие множества наборов скоростей и толщин, для которых  $\Delta t_{01}$  близко к нулю приведет к тому, что целевая функция будет иметь ярко выраженный «овражистый»



Рис. 4. График разницы времен приходов  $\Delta t_{01}$  без эффекта трансформации (кривая зеленого цвета) и с учетом (кривая красного цвета).

вид. На рис. 4 линией красного цвета показан график  $\Delta t_{01}$  для двух пар параметров при учете трансформации типа волны при отражении от дна: ((5,9, 3,23) мм/мкс, 6 мм) и ((5,91, 3,22) мм/мкс, 5,958 мм). В этом случае разница времен приходов  $\Delta t_{01}$  в размахе составляет уже величину около 31 нс. То есть рассчитанные эхосигналы будут больше отличаться для двух пар параметров, чем при отражении без трансформации типа волны. Поэтому при выборе акустических схем нужно отдавать предпочтение акустическим схемам с трансформацией типа волны.

Еще одно обстоятельство, которое нужно учесть при выборе акустических схем, это амплитуда импульса, отраженного от дна. На рис. 26 хорошо видно, что акустическую схему **TT** не целесообразно использовать из-за малой амплитуды импульса.

### 2.4. Выбор решения

Как отмечено в разделе 2.3, целевая функция имеет «овражистый» вид, а измерительный шум и операторный шум приведут к тому, что целевая функция будет иметь множество минимумов. Это означает, что для произвольного начального значения  $\mathbf{v}_0$  процедуры минимизации, скорее всего, найти глобальный минимум целевой функции не удастся, и точное решение будет не получено  $\hat{\mathbf{v}}_0 \neq \mathbf{v}_{\text{точн}}$ .

### 2.4.1. Усреднение решений по критерию значения целевой функции

Для поиска глобального минимума целевой функции при наличии локальных минимумов и в условиях зашумленных измеренных эхосигналов, можно поступить следующим образом: задача решается для множества исходных точек  $\{\mathbf{v}_0\}$ , из всех полученных решений  $\{\hat{\mathbf{v}}_0\}$ отбираются решения по критерию наименьшего значения целевой функции и после усреднения отобранных решений определяются скорости продольной и поперечной волны и толщина образца  $\{\hat{c}_i, \hat{c}_i, \hat{h}\} = \langle \{\hat{\mathbf{v}}_0\} \rangle$ . Как показывает опыт, для эффективного применения предложенного метода задача минимизации (1) должна быть решена не меньше 20 раз.

### 2.4.2. Дополнительные ограничения

Зная ожидаемые значения скоростей звука и толщины, можно дополнительно ограничить выбор решений  $\{\hat{\mathbf{v}}_0\}$  для усреднения. При измерениях на объекте контроля можно выбрать решения, попадающие в диапазон  $\mathbf{v}_{\text{паспорт}} \pm \Delta \mathbf{v}$ , определяемый технологией его изготовления. Такой подход дает очень неплохой результат, но он может сильно исказить решение, так как зависит от номинального значения  $\mathbf{v}_{\text{паспорт}}$ . Это сильно ограничивает эффективность такого подхода для выбора решения.

### 2.4.3. Явный расчет целевой функции

Вместо решения множества задач минимизации можно на достаточно грубой сетке  $\{\mathbf{v}_{rpy\delta}\}$  рассчитать значения целевой функции  $D(\{\mathbf{v}_{rpy\delta}\})$ , подобрать нужный порядок аппроксимирующего полинома, и получить значения целевой функции на более точной сетке  $\{\mathbf{v}_{annpoke}\}$  и уже на ней найти минимум целевой функции  $D(\{\mathbf{v}_{annpoke}\})$  и обеспечивающее его значение  $\hat{\mathbf{v}}$ . Если грубая сетка  $\{\mathbf{v}_{rpy\delta}\}$  будет состоять из 20 значений по каждой искомой величине, то расчет поля по формуле придется выполнить 8 000 раз. Это достаточно большой объем вычислений. Если учесть, что задача решается с необходимой точностью примерно за 40 итераций (для чего нужно рассчитать целевую функцию около 80 раз), то для 20 начальных точек  $\{\mathbf{v}_0\}$  в общей сложности по формуле придется рассчитать  $\hat{p}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$  только 1 600 раз. Более тщательная сетка  $\{\mathbf{v}_{rpy\delta}\}$  и увеличение числа искомых переменных делают этот подход очень затратным с вычислительной точки зрения.

#### 2.4.4. Кластеризация

Множество полученных решений  $\{\hat{\mathbf{v}}_0\}$  можно кластеризовать, оценить среднее значение целевой функции по каждому кластеру и выбрать решение как среднее значение по кластеру  $\langle\{\hat{\mathbf{v}}_0\}_{\text{класт}}\rangle$  с минимальным значением целевой функции. Такой подход напоминает подход, изложенный в разделе 2.4.2, но он не требует априорного знания искомых параметров  $\mathbf{v}_{\text{паспорт}}$  и представляется перспективным.

### 3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

#### 3.1. К чему приводит ошибка определения времени прихода импульса в 20 нс?

Из простейшего анализа следует, что ошибка измерения времени прихода эхосигнала  $\delta t$  в 20 нс (один отсчет при частоте дискретизации эхосигнала, равной 50 МГц!) для объекта контроля толщиной 6 мм приводит к ошибке определении скорости продольной волны, равной 1 %. Для образца толщиной 30 мм ошибка существенно меньше — 0,2 %.

### 3.2. Качество антенной решетки

Разная чувствительность элементов антенной решетки, которая обычно лежит в пределах  $\pm 1,5$  дБ, их индивидуальные задержки при излучении и приеме приводят к ошибкам оценки скоростей звука и толщины образца. Как показывает практика, индивидуальные задержки элементов обычных антенных решеток могут достигать величин 60 нс. Это очень большая ошибка, особенно при проведении измерений в тонких объектах контроля (см. раздел 3.1). В лучшем случае она приведет к появлению локальных минимумов целевой функции или, что хуже, к смещению минимума целевой функции. Причина возникновения индивидуальных задержек не совсем понятна: то ли пьезоэлементы антенной решетки находятся на разных глубинах, то ли протектор обладает неоднородными свойствами, то ли это влияние электронного тракта ЦФА-дефектоскопа. В данной статье индивидуальные задержки антенных решеток определяли по методике, изложенной в разделе 5.1. Неравномерность свойств элементов антенной решетки и корректируя чувствительной пометодике, водя компенсирующие индивидуальные задержки и корректируя чувствительность измеренных элементов.

## 3.3. Учет времени пробега в протекторе

Отдельная проблема заключается в определении и учете времени задержки в протекторе антенной решетки  $t_{\text{prot}}$ . Если акустические и геометрические свойства протектора антенной решетки известны, то его влияние можно учесть при расчетах, несколько усложнив формулу (4) и введя в нее дополнительный слой, который отмечен на рис. 1 прямоугольником желтого цвета. Однако производители антенных решеток не делятся этой информацией, по крайней мере, с «Научнопроизводственным центром «ЭХО+» [16]!

Отметим еще одну схожую проблему. Даже для ЦФА-дефектоскопов одного производителя начало временной апертуры для измеренных эхосигналов может иметь разброс в несколько сотен наносекунд. При формировании изображения отражателей это обстоятельство не принципиально, но для решения задачи (1) неточность определения нулевого момента времени означает возникновение ошибки  $\delta t$  измерения времени задержки эхосигнала, что приведет к существенной ошибке определения скорости и толщины (см. раздел 3.1).

#### 3.4. Проблема выбора эталонного эхосигнала

Так как для расчета поля по формуле (4) нужно знать форму зондирующего сигнала s(t), то возникает проблема — откуда взять эту информацию? В идеальном случае нужно измерить форму зондирующего сигнала, подаваемого на генератор, определить амплитудно-частотную характеристику электронного тракта дефектоскопа с учетом резонансных свойств конкретной антенной решетки и после операции свертки получить форму принятого эхосигнала. Кроме того, нужно учесть изменение формы сигнала при его отражении от дна и при преломлении на границе. Ну и наконец, может возникнуть необходимость учесть неизвестную дисперсию в объекте контроля.

На практике для определения сигнала s(t) можно воспользоваться следующим приемом. Нужно отключить все фильтры приемного усилителя и для каждого элемента антенной решетки выделить из измеренных сигналов эхосигнал  $s_{nn}(t)$ , где  $n = 1, 2, ..., N_e$ , однократно отраженный от дна на продольной волне (на рис. 2 — это сигнал акустической схемы LL). Далее выровнять все эхосигналы по времени так, чтобы совпадали их максимальные значения, и усреднить их  $\langle s_{nn}(t) \rangle$ . Полученный сигнал можно использовать в качестве s(t). Такой подход позволяет учесть особенности акустического тракта дефектоскопа, и, в какой-то степени, учесть эффект дисперсии. Но даже и в этом случае остается проблема выбора начала сигнала при анализе  $s_{nn}(t)$ . Ее можно проиллюстрировать на примере рис. 6 — ошибка определения начала импульса s(t) может достигнуть 20 нс и более.

## 3.5. Точность расчета формы эхосигналов

Маленькая толщина объекта контроля приводит к значительным отклонениям луча от нормали к поверхности пьезоэлемента, что приводит к искажению формы эхосигнала. Для решения этой проблемы пьезоэлемент нужно рассматривать не как точку со своей диаграммой направленности в соответствии с формулой (4), а проводить расчет эхосигналов  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_t, t; \mathbf{v})$  с разбиением поверхности излучающего и приемного пьезоэлемента на множество элементарных площадок. В этом случае функция  $B(\alpha)$  будет описывать диаграмму направленности нормальной силы, приложенной к поверхности призмы, и ее можно приближенно представить как  $B(\alpha) \approx \cos(\alpha)$ . Такой подход более точный, но он существенно замедлит расчет эхосигналов.

Уменьшить влияние ошибки определения s(t) на точность определения скоростей и толщины, можно за счет выбора для сравнения эхосигналов выстрелов центральных элементов антенной решетки, когда углы преломления и отражения минимальны. Но такой подход приведет к уменьшению крутизны стенок целевой функции.

### 3.6. Свойства призмы

Если толщину призмы и ее клиновидность можно легко измерить и проверить с помощью микрометра с точностью ±0,0025 мм, то определение скорости продольной волны в призме с точностью 0,1 % представляет собой существенную проблему. Обычные толщиномеры для таких целей не подходят, а более точные толщиномеры типа [4] достаточно дороги и могут быть оперативно недоступны. Нужно учесть и то обстоятельство, что в рексолите или плексигласе, из которых обычно изготавливают призмы, большое поглощение, и форма эхосигнала из-за дисперсии будет зависеть от толщины призмы, что приведет к ухудшению точности работы толщиномера.

При выборе толщины призмы нужно руководствоваться двумя соображениями. Во-первых, высота призмы определяется толщиной объекта контроля и соблюдением условия не пересечения импульсов после многократных отражений в призме с эхосигналами, отраженными от дна. С этой точки зрения толщину призмы целесообразно сделать как можно больше для использования на объектах контроля с большим диапазоном толщин. С другой стороны, чем ближе антенная решетка к объекту контроля, то есть чем меньше толщина призмы, тем под большими углами лучи входят в объект контроля и тем больше будут задержки эхосигналов от дна для разных элементов антенной решетки, и, следовательно, целевая функция будет иметь менее «овражистый» вид.

### 3.7. Плоскопараллельность объекта контроля

Если объект контроля не плоскопараллелен и имеет форму клина с углом  $\alpha_{obj}$ , то из-за неверного расчета  $\hat{p}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$  будет искажена целевая функция, что приведет к ошибке определения скоростей звука и толщины образца. Причем чем меньше толщина объекта контроля, тем критичнее нарушение плоскопараллельности. Один из способов выхода из такой ситуации заключается в добавлении угла  $\alpha_{obj}$  в вектор  $\mathbf{v} = \{c_i, c_s, h\}$ . Но при таком подходе число переменных  $\mathbf{v} = \{c_i, c_s, h, \alpha_{obj}\}$ , по которым производится минимизация, увеличивается до четырех, что приведет к увеличению времени решения задачи.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первоначальная проверка работоспособности метода определения скоростей звука и толщины образца была проведена на эхосигналах, рассчитанных с помощью теории лучевых трубок программой CIVA 2017 [17].

#### 4.1. Высота призмы 35 мм

Расчет эхосигналов с учетом четырех отражений от границ объекта контроля толщиной h = 6 мм из стали (( $c_1 = 5,9, c_{11} = 3,23$ ) мм/мкс,  $\rho = 0,0078$  г/мм<sup>3</sup>) проводили для антенной



Рис. 5. Исходные точки и решения задачи (1), представленные в плоскости  $(c_i, h)$ .

решетки 32×(0,75+0,25) мм на 5 МГц, установленной на плексигласовую призму (( $c_{w,l} = 2,68$ ,  $c_{w,t} = 1,32$ ) мм/мкс,  $\rho_w = 0,0018$  г/мм<sup>3</sup>) толщиной 35 мм с углом наклона 0 град. По рассчитанным с помощью формулы (4) эхосигналам  $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$  для пяти выстрелов

По рассчитанным с помощью формулы (4) эхосигналам  $P(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$  для пяти выстрелов согласно списку (11, 14, 17, 20, 23), выбранному с учетом замечаний в разделе 3.5, для 12 акустических схем ( $\{as\} = \mathbf{LT}, \mathbf{TL}, \mathbf{TLLL}, \mathbf{LTLL}, \mathbf{LLTL}, \mathbf{LLLT}, \mathbf{TTLL}, \mathbf{TLTL}, \mathbf{TLTL}, \mathbf{LTTL}, \mathbf{LT}, \mathbf{LTTL}, \mathbf{LT}, \mathbf{LT}, \mathbf{LTTL}, \mathbf{LT}, \mathbf{LT}, \mathbf{L}, \mathbf$ 

Использование целевой функции  $D_m(\mathbf{v}; a, a_{\varepsilon})$  согласно (2) из-за не достаточно точного совпадения амплитуд измеренных и рассчитанных импульсов (см. рис. 3), как и утверждалось в разделе 2.1, привело к заметно худшему результату оценки вектора **v**.

#### 4.2. Высота призмы 10 мм

Уменьшение высоты призмы привело к повышению точности решения задачи (см. раздел 3.6). Оценка скоростей продольной и поперечной волны дала значения (5,899, 3,224) мм/мкс, а толщина образца была определена как 5,998 мм.

### 5. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводили с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР АРТ», разработанного и изготовляемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [17]. Измеренные ЦФА-дефектоскопом эхосигналы записываются в базу данных. В среде MatLab [18] была написана программа, с помощью которой из базы данных извлекались эхосигналы, измеренные в режиме двойного сканирования, решалась задача (1), при расчете эхосигналов по формуле (4). Список используемых выстрелов и список акустических схем такие же, что и в разделе 4.1.

### 5.1. Уточнение параметров используемых антенных решеток и призм

Для измерений эхосигналов использовали две антенные решетки на 5 МГц из 32 элементов размерами 0,9×10,0 мм с зазором между элементами 0,1 мм и две плексигласовые призмы высотой около 35 мм с нулевым углом наклона.

Толщину призм  $h_w$  измеряли с точностью 0,01 мм электронным штангенциркулем, а скорость продольных волн  $c_{wl}$  (с использованием значений  $h_w$ ) с относительной погрешностью 0,5 % толщиномером KARL DEUTSCH с преобразователем на 4 МГц. Результаты прямых измерений сведены в табл. 1. Обращает на себя внимание большая разница значений скоростей продольной волны в призмах, которые были сделаны из разных плексигласовых заготовок.

Таблица 1

Призма	Скорость звука, мм/мкс	Толщина, мм
1	2,687±0,013	34,59±0,01
2	2,735±0,014	34,95±0,01

Прямые измерения параметров призм

Время пробега  $t_{prot}$  в протекторе антенной решетки не указывается в ее паспорте и определяется толщиной просветляющего протектора [19]. Поэтому  $t_{prot}$  определялась согласно методике, изложенной в статье [20]. В совмещенном режиме каждым элементом антенной решетки регистрировались эхосигналы  $s_{nn}(t)$ , отраженные от дна призмы, на которую установлена антенная решетка. На рис. 6 показаны 32 эхосигнала  $s_{nn}(t)$  ( $n = 1, 2, ..., N_e$ ), отраженных от дна призмы. Хорошо видно, что между импульсами существуют индивидуальные задержки, достигающие значения 50 нс, что равно четверти периода несущей частоты.



Рис. 6. Определение времени задержки в протекторе.

После определения начала импульса  $t_s$  с максимальной точностью (что представляет собой не тривиальную задачу (рис. 6)) время задержки в протекторе можно найти по формуле  $t_{prot} = t_s - 2h_w / c_{w,l}$ . Результаты определения  $t_{prot}$  приведены в табл. 2.

Т	a	б	Л	И	ц	a	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Измерения времени задержки t<sub>prot</sub> в протекторе антенной решетки

Антенная решетка	Задержка, нс
1	150±25
2	190±25

### 5.2. Образец толщиной 6,810 мм, измерения разными антенными решетками и призмами

### 5.2.1. Прямые измерения параметров образца

Измерения толщины образца микрометром показали результат 6,810±0,0025 мм. В пределах погрешности измерения толщины образец был плоскопараллелен. Так как точность измерения

длины и ширины образца не принципиальна, то они измерялись линейкой и были равны 100 и 35 мм. Измерения скорости продольной волны в нескольких точках образца толщиномером KARL DEUTSCH 11334 с преобразователем на 8 МГц показали значение 5,918 мм/мкс при относительной погрешности 0,1 %, которая выше чем в разделе 5.1, так как толщина образца меньше, преобразователь имеет в два раза большую частоту, а калибровка толщиномера проводилась на стальном эталоне толщиной 5 мм. И тем не менее даже для точности 0,1 % интервал возможных значений скорости продольной волны достаточно велик и равен (5,912, 5,924) мм/мкс.

## 5.2.2. Результаты определения значений скоростей звука и толщины образца

Измерения эхосигналов приводились двумя парами: антенная решетка и призма с номерами 1 и антенная решетка и призма с номерами 2. Результаты определения скоростей продольной и поперечной волн и толщины образца с указанием относительных погрешностей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Решетка и призма	Скорость, мм/мкс		Толщина, мм	Относительная погрешность		
Прямые измерения	5,918±0.006	3,230±0.0003	6,810±0.0025			
Пара 1	5,920	3,228	6,798	-0,04 %	0,06 %	0,17 %
Пара 2	5,918	3,228	6,814	0,01 %	0,07 %	-0,06 %

Результаты определения скоростей продольной и поперечной волн и толщины

Так как наиболее точно может быть измерена толщина образца, то относительную погрешность ее измерения можно рассматривать как критерий работы метода (1), ее максимальное среднее значение 0,17 %. Относительные погрешности определения скоростей звука по отношению к прямым измерениям меньше 0,1 % для двух пар «антенная решетка на призме». Совпадение результатов работы безэталонного метода с точностью 0,25 % при обработке эхосигналов, измеренных двумя парами (антенная решетка и призма), свидетельствует о его работоспособности.

# 5.3. Образец толщиной 6,060 мм, направления 0 и 90 град

### 5.3.1. Прямые измерения параметров образца

Измерения толщины образца микрометром в четырех точках показали его незначительную клиновидность — разница между максимальным и минимальным значениями толщины была равна 0,006 мм. Средняя толщина образца полагалась равной 6,060±0,0025 мм. Длину и ширину образца измеряли с помощью линейки, они имели 150 и 40 мм. Измерения скорости продольной волны в нескольких точках (с учетом переменной толщины образца) проводили толщиномером KARL DEUTSCH 11334 с преобразователем на 8 МГц и показали значение 5,902 мм/мкс при относительной погрешности 0,1 %. Для точности 0,1 % интервал возможных значений скорости продольной дольной волны равен (5,896, 5,908) мм/мкс.

# 5.3.2. Результаты определения значений скоростей звука и толщины образца

Измерения эхосигналов приводили одновременно двумя парами (антенная решетка и призма) с номерами 1 и 2. Размещение антенной решетки 1 вдоль длинной стороны образца принималось за 0 град, а в поперечном направлении — за 90 град (см. рис. 7). Результаты определения параметров образца приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты	определения	параметров	образца ;	для углов	0и90	градусов
•	<b>I</b> ' '		<b>I</b> ' '			

Решетка и призма	Скорость, мм/мкс		Толщина, мм	Относительная погрешность		
Прямые измерения	5,902±0,006	3,240±0,003	6,060±0,0025			
0 град, пара 1	5,894	3,241	6,043	0,15 %	-0,03 %	0,27 %
90 град, пара 2	5,901	3,243	6,058	0,02 %	-0,08 %	0,03 %



Рис. 7. Схема измерения двумя парами (антенная решетка и призма).

Относительная погрешность определения скоростей звука и толщины для направления 90 град оказалась меньше 0,1 %, а в направлении 0 град максимальное значение точности равно 0,27 %. Скорее всего, такая разница точностей объясняется незначительной клиновидностью образца.

## 6. ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

Предложенный безэталонный метод измерения продольной и поперечной скорости звука и толщины плоскопараллельного образца в модельных экспериментах показал точность около 0,25 %.

Для измерения скоростей и толщины образца не нужна специальная аппаратура — измерение эхосигналов можно провести с помощью обычного ЦФА-дефектоскопа и получить результат, проведя вычисления по формулам (1), (3), и (4) с помощью специальной программы.

Предложенный метод может определять скорости продольной и вертикально поляризованной поперечной волны по разным направлениям в объекте контроля. Это позволит оценить анизотропию материала объекта контроля, которая может быть коррелирована с его физико-механическими свойствами.

Предложенный метод после уточнения значений параметров, рассмотренных в разделе 3, должен обеспечить измерения скоростей звука и толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами с точностью на менее чем 0,1 %.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 16809—2015. Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. М.: Стандартинформ, 2015. 31 с.

2. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща 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. 2010. № 4 (32), 2010. С. 18—28.

4. Ультразвуковой прибор для измерения механических напряжений ИН-5101A, URL: http://www. encotes.ru/?q=node/25 (дата обращения: 19.02.2019).

5. *Базулин Е.Г.* Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.

6. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1 (51). С. 64—70.

7. Неразрушающий контроль / Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.

8. Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г. Многократные ультразвуковые волны в пластине. Анализ и применение // В мире неразрушающего контроля. 2016. № 1. С. 36—41.

9. Концов Р.В. Разработка методов и устройств ультразвуковой томографии крупногабаритных строительных конструкций из сложно-структурного бетона нестандартной конфигурации / Диссертация. НИУ «МЭИ». Россия. 2018. С. 145.

10. Королев М.В., Карпельсон А.Е., Шевалдыкин В.Г., Стариков Б.П. Способ ультразвуковой безэталонной толщинометрии // Авторское свидетельство СССР SU1221489 А. Бюл. изобр. № 12. 1986.

11. Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М. Одновременное измерение скорости ультразвуковой поперечной волны и толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами с использованием двух антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 20—34.

12. Бабич В.М., Киселев А.П. Упругие волны. Высокочастотная теория. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. С. 320.

13. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.

14. *Schmerr L.W. Jr.* Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach / Second Edition. Springer. 2016. 492 p. DOI 10.1007/978-3-319-30463-2.

15. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. Изд.2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.

16. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: http://www.echoplus.ru (дата обращения: 19.02.2019).

17. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: http://www.extende.com/ (дата обращения: 19.02.2019).

18. Официальный сайт фирмы MathWorks. URL: https://matlabacademy.mathworks.com/ (дата обращения: 14.04.2019).

19. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

20. *Базулин Е.Г.* Калибровка ультразвуковой антенной решетки, установленной на призму // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 50—63.

.\_\_\_\_\_