

АНАЛИЗ ДВУХ СПОСОБОВ КАЛИБРОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА ПРИЗМУ

© 2024 г. А.Е. Базулин^{1,*}, Е.Г. Базулин¹, А.Х. Вopilкин¹, С.А. Коколев¹, С.В. Ромашкин¹, Д.С. Тихонов¹, А.А. Ефимовская²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»
Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»
²Московский Энергетический Институт (Национальный исследовательский университет),
Россия 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 09.02.2024; после доработки 02.03.2024
Принята к публикации 15.03.2024

Качество изображения отражателей, восстановленное по технологии цифровой фокусировки антенной или технологии фазированных антенных решеток, зависит от точности определения таких параметров призмы, как стрела, путь, скорость продольной волны и угол наклона. Эти параметры не всегда соответствуют паспортным параметрам как из-за точности изготовления призм и размещения элементов антенной решетки в корпусе, так и из-за износа призм при эксплуатации. В статье рассматриваются два типа калибровки антенной решетки, установленной на призму: вариационная и упрощенная. Принцип вариационной калибровки заключается в минимизации целевой функции, описывающей разницу между измеренными антенной решеткой эхосигналами от боковых цилиндрических отверстий, например, в образце ISO 19675 PAUT BLOCK, и рассчитанными эхосигналами. Упрощенная калибровка основана на анализе времени прихода эхосигналов от подошвы призмы, что позволяет оценить путь и угол наклона призмы, зная скорость продольной волны в призме. Работа вариационной калибровки проверена на эхосигналах, рассчитанных в программе CIVA, для демонстрации овражистой структуры целевой функции. Сделана оценка необходимой точности определения всех четырех параметров призмы. Приведены результаты калибровки антенной решетки на четырех призмах и проведена проверка результатов вариационной и упрощенной калибровок. Точность определения параметров призмы при использовании вариационной калибровки более чем в два раза лучше результатов, получаемых при упрощенной калибровке. Однако время, необходимое для проведения расчетов при вариационной калибровке, более чем на три порядка больше, чем для упрощенной калибровки.

Ключевые слова: антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), тройное сканирование, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), цифровая фокусировка антенной (ЦФА).

ANALYSIS OF TWO METHODS OF CALIBRATION OF AN ULTRASONIC ANTENNA ARRAY MOUNTED ON A PRISM

© 2024 A.E. Bazulin^{1,*}, E.G. Bazulin¹, A.H. Vopilkin¹, S.A. Kokolev¹, S.V. Romashkin¹, D.S. Tikhonov¹, A.A. Efimovskaya²

¹ECHO+ Research and Production Center LLC,
8, Tvardovskogo, Technopark "Strogino" St., Moscow 123458 Russia
²Moscow Power Engineering Institute (National Research University),
14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250 Russia
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

The image quality of the reflectors, restored using digital antenna focusing technology or phased array technology, depends on the accuracy of determining such parameters of the prism as the boom, path, longitudinal wave velocity and angle of inclination. These parameters do not always correspond to the passport parameters, both due to the accuracy of the manufacture of prisms and the placement of antenna array elements in the housing, and due to the wear of the prisms during operation. The article discusses two types of calibration of an antenna array mounted on a prism: variational and simplified. The principle of variational calibration is to minimize the objective function describing the difference between the echo signals measured by the antenna array from the side cylindrical holes, for example, in the ISO 19675 PAUT BLOCK sample and the calculated echo signals. Simplified calibration is based on the analysis of the arrival time of echo signals from the prism sole, which allows you to estimate the path and angle of inclination of the prism, knowing the velocity of the longitudinal wave in the prism. The operation of the variational calibration was tested on echo signals calculated in the CIVA program to demonstrate the gully structure of the target function. An assessment of the required accuracy of determining all four parameters of the prism is made. The results of calibration of the antenna array on four prisms are presented and the results of variational and simplified calibrations are verified. The accuracy of determining the parameters of the prism when using variational calibration is more than twice as good as the results obtained with simplified calibration. However, the time required for calculations with variational calibration is more than three orders of magnitude longer than for simplified calibration.

Keywords: antenna array, Full Matrix Capture (FMC), triple scanning, C-SAFT, Total Focusing Method (TFM), digital antenna focusing (DAF).

DOI: 10.31857/S0130308224020024

1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении эксплуатационного ультразвукового неразрушающего контроля очень важной задачей является задача мониторинга за развитием ранее обнаруженных отражателей, размеры которых тем не менее позволяют согласно действующей нормативной документации эксплуатировать оборудование [1]. Периодические измерения размеров отражателя (либо по технологии фазированных антенных решеток (ФАР) [2], либо по технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [3]) с использованием разных экземпляров призм и антенных решеток могут привести к тому, что размеры и координаты отражателя будут определяться с большим разбросом, который не позволит сделать вывод о степени его роста.

На качество ФАР- или ЦФА-изображений сильно влияет точность, с которой известны параметры призмы и антенной решетки. Для антенной решетки нужно знать время нарастания импульса t_{\max} и время задержки в согласующем протекторе t_{prot} , а также такие параметры призмы, как стрела a_w , путь в призме p_w , скорость продольных волн $c_{w,l}$ в призме и угол наклона призмы β_w (рис. 1б). Погрешность в задании этих параметров может привести к тому, что блики на изображении, соответствующие несплошностям, будут расфокусированы и смещены от своих истинных положений. Поэтому для получения бликов, максимально точно совпадающих с границами несплошностей, нужно знать параметры призмы и антенной решетки, которые могут не совпадать с паспортными или могут измениться в зависимости от условий эксплуатации. Отметим, что важно знать и геометрикоакустические свойства объекта контроля для восстановления максимально точного изображения, но это уже вопрос не только калибровки призмы, а настройки дефектоскопа перед проведением контроля.

Под калибровкой будем подразумевать процедуру определения параметров призмы (стрела a_w , путь p_w , скорость продольной волны $c_{w,l}$ и угол наклона β_w), на которую установлена антенная решетка. В данной статье сравнивались результаты двух технологий калибровки:

1. Упрощенная калибровка, с помощью которой определяются два параметра призмы (путь p_w и угол наклона β_w) по эхосигналам, отраженным от подошвы призмы в воздухе. Такой способ калибровки был предложен в статье [4].

2. Вариационная калибровка, с помощью которой по измеренным эхосигналам в эталонном образце с несколькими боковыми цилиндрическими отверстиями (БЦО), например, ISO 19675 PAUT BLOCK [5], определяются четыре параметра призмы (стрела a_w , путь p_w , скорость продольной волны $c_{w,l}$ и угол наклона β_w). В статье [6] предлагалось проводить калибровку на нестандартном образце толщиной 18 мм с одним БЦО диаметром 2 мм на глубине 12 мм с учетом импульсов, отраженных от дна.

Проверка результатов калибровки пары «антенная решетка—призма» проводилась при сравнении координат бликов границ БЦО на ЦФА-изображении с координатами границ БЦО на разных глубинах в эталонном образце. В образцах для калибровки и проверки должны быть максимально точно измерены скорости продольной и поперечной волны и диаметры БЦО и координаты их центров.

2. СПОСОБЫ КАЛИБРОВКИ И ПРОВЕРКИ

2.1. Упрощенная калибровка

В ряде современных дефектоскопов используется способ определения пути p_w и угла наклона призмы β_w по задержкам эхосигналов, отраженных от подошвы призмы для всех элементов антенной решетки [4]. Точность измерения угла наклона β_w и пути в призме p_w в первую очередь определяется точностью, с которой известна скорость продольной волны в призме $c_{w,l}$.

Упрощенная калибровка выполняется следующим образом. Антенная решетка устанавливается на призму, подошва которой находится в воздухе. Затем регистрируются эхосигналы, отраженные от подошвы призмы в режиме линейного сканирования с апертурой в один элемент для всех элементов антенной решетки. На рис. 1а в растровом виде показаны эхосигналы от подошвы призмы. Для каждого эхосигнала определяется время прихода, и по известной скорости продольной волны в призме $c_{w,l}$ рассчитывается высота расположения каждого элемента h_i над подошвой призмы. На рис. 1б окружностями красного цвета показаны вычисленные положения элементов антенной решетки.

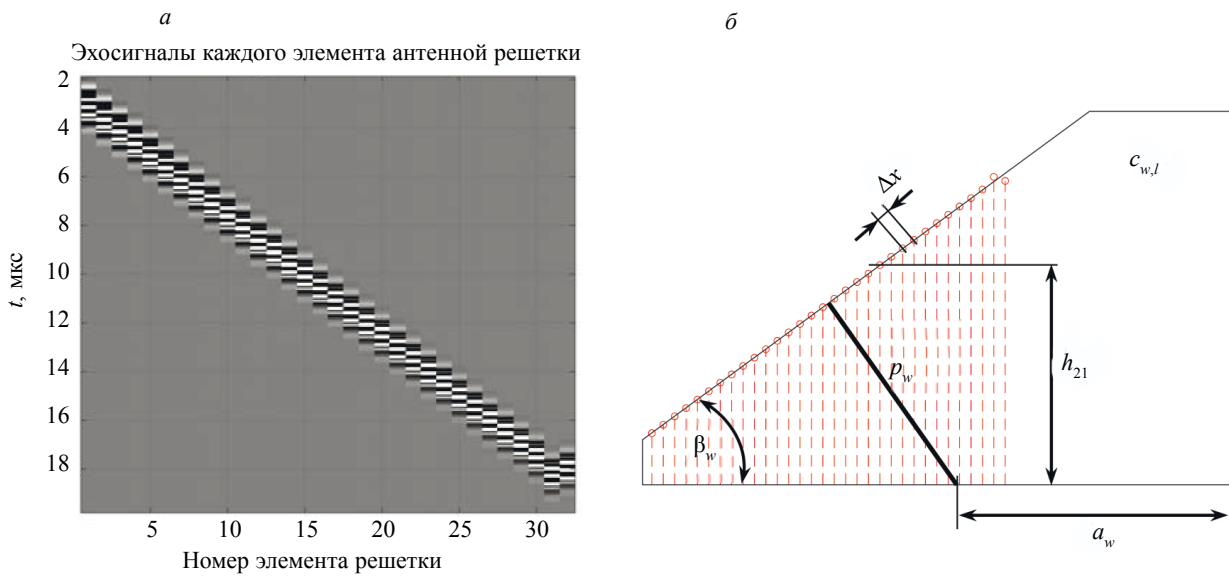


Рис. 1. Эхосигналы, отраженные от подошвы призмы и принятые каждым элементом антенной решетки из 32 элементов (а); схематичное представление расчета угла наклона и пути в призме (б).

Определив h_i , угол наклона β_w и путь в призме p_w можно рассчитать по формулам:

$$\beta_w = \frac{\sum_{i=2}^{N_e} \arcsin\left(\frac{(i-1) \cdot \Delta x}{h_i - h_1}\right)}{N-1}, p_w = h_1 \cdot \cos(\beta_w) + \frac{(N_e - 1) \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg}(\beta_w)}{2},$$

где N_e — количество элементов решетки; Δx — расстояние между центрами элементов.

Упрощенная калибровка — простая и быстрая процедура, но с ее помощью невозможно определить стрелу призмы a_w . Для этого нужно провести дополнительные измерения, что усложняет и удлиняет процедуру определения параметров призмы. Еще одна проблема возникает при увеличении угла наклона призмы: из-за краевой волны [7, 8] форма эхосигнала от дна заметно искажается, что влияет на точность работы алгоритма. На рис. 2а показан эхосигнал, отраженный от подошвы призмы с углом наклона 20 град, а на рис. 2б — с углом наклона 42 град. Форма сигнала во втором случае существенно искажена, поэтому определение времени его прихода усложняется.

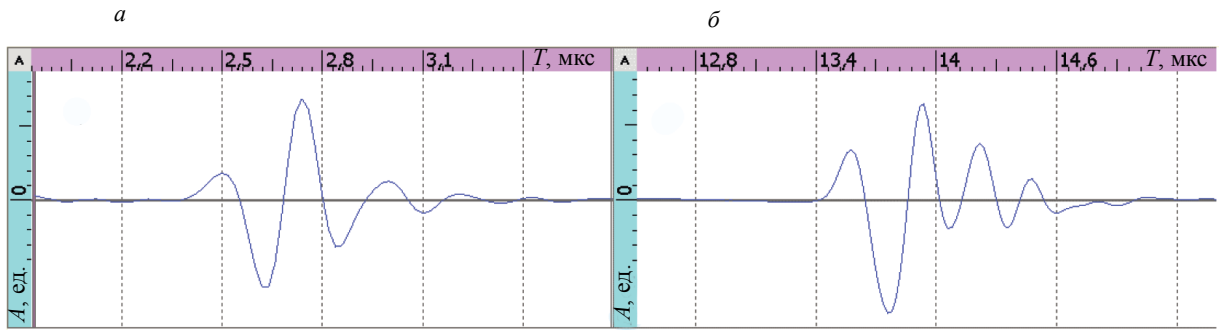


Рис. 2. Эхосигналы, отраженные от подошвы призмы с углом наклона 20 град (а) и углом наклона 42 град (б).

2.2. Вариационная калибровка

В статье [6] был предложен вариационный алгоритм определения стрелы a_w , пути в призме p_w , скорости продольной волны $c_{w,l}$ и угла наклона β_w как решение оптимизационной задачи нахождения минимальной разности между измеренными эхосигналами от нескольких БЦО, например, от четырех БЦО в стандартизированном образце ISO 19675 PAUT BLOCK, и рассчитанными эхосигналами. Обозначим через $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ эхосигналы, измеренные от нескольких БЦО при излучении импульса из точки \mathbf{r}_t и приеме в точке \mathbf{r}_r . Задав параметры антенной решетки и призмы, зная координаты БЦО известного диаметра, можно рассчитать эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$, где $\mathbf{v} = (a_w, p_w, c_{w,l}, \beta_w)$. Критерием максимального совпадения измеренных эхосигналов $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и их оценки $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ может служить достижение минимума целевой функции $D(\mathbf{v})$:

$$\mathbf{v} = \arg \min_{\mathbf{v} \in \mathcal{R}^4} D(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t), \hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})). \quad (1)$$

Значение $\mathbf{v} = (a_w, p_w, c_{w,l}, \beta_w)$, при котором будет достигаться минимум целевой функции $D(p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t), \hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})) = D(\mathbf{v})$, будет решением задачи калибровки. В качестве целевой функции можно рассматривать среднеквадратическое отклонение двух функций, величину обратную функции их корреляции [6], расстояние Кульбака—Лейблера [9] между двумя функциями и иные метрики.

Существует множество методов решения задачи оптимизации. Выбор конкретного метода зависит от ее размерности, типа целевой функции $D(\mathbf{v})$, наличия ограничений, знания градиента и Гесса, т.е. второй производной целевой функции. Часто применяемый симплексный метод заключается в поиске минимума целевой функции за счет оценки градиента по значениям на вершинах выпуклого многогранника (симплекса) [10]. Однако симплексный метод может столкнуться с проблемой остановки вычислений в локальном минимуме целевой функции. Поэтому для нахождения глобального минимума задачу приходится решать для многих начальных точек $\{\mathbf{v}\}$, что увеличивает время расчета.

Существует класс методов поиска глобального минимума функций, основанный на биоинспирированных принципах работы, например, метод роевого интеллекта (particle swarm optimization (PSO)) [11] или его модификация, называемая квантовоповеденческая (quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO)) [12]. Метод QPSO в сравнении с методом PSO имеет меньше вероятность остановки вычислений в локальном минимуме целевой функции.

Опыт применения упомянутых методов решения задачи оптимизации, согласно формуле (1), не показал принципиального преимущества ни одного из них. Поэтому в данной работе использовался симплексный метод со множеством $\{\mathbf{v}\}$ из 24 начальных точек.

2.2.1. Расчет эхосигналов от БЦО

Это классическая задача, которая решена для пьезоэлементов разной формы как аналитически [13, 7, 14, 15], так и с помощью специализированных программ, например, CIV4 [16], которая позволяет рассчитывать эхосигналы от различных отражателей с помощью теории лучевых трубок. Известны аналитические решения в гармоническом варианте расчета амплитуды поля отраженного от БЦО при излучении из точки \mathbf{r}_t и приеме в точке \mathbf{r}_r [13, 14, 17] пьезопластинами заданных размеров и формы.

В самом простом варианте рассчитать эхосигналы $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ можно следующим образом: с помощью принципа Ферма [18] рассчитывается время пробега импульса и лучевая траектория от центра излучающего элемента антенной решетки до границы «призма—образец», далее до точки зеркального отражения от поверхности БЦО и до центра регистрирующего элемента антенной решетки с учетом преломления на границе «образец—призма». Для определения амплитуды эхосигнала можно воспользоваться стандартными формулами для расчета диаграммы направленности элемента решетки для излучения и приема, формулами для расчета коэффициента преломления на границе со скольжением для разных типов волн и формулой для расчета коэффициента отражения на абсолютно мягкой границе. Конечно, при преломлении и отражении нужно учитывать изменение амплитуды импульса из-за изменения радиуса волнового фронта. Такой подход позволяет быстро рассчитывать поле $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$, но он не позволяет отслеживать измерение формы импульса (см. рис. 2а) при значительном отклонении луча от акустической оси антенной решетки на призме.

В более точном варианте расчета поверхности излучающего и приемного элемента антенной решетки поверхность БЦО разбиваются на элементарные площадки. Падающий луч на любой освещенной элементарной площадке БЦО рассчитывается с учетом множества лучей от всех элементарных площадок излучателя. Для каждой элементарной площадки поверхности БЦО рассчитываются импульсы на всех элементарных площадках приемного элемента с учетом формы падающего импульса, а эффект рассеивания можно учесть в приближении Кирхгофа. Так, в работе [14] приведены формулы для расчета коэффициентов отражения от площадки при падении и отражении лучей с произвольными углами с учетом трансформации типа волны. Интегрирование по поверхности приемника позволяет оценить измеренный эхосигнал $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$. Такой подход более точный и позволяет отслеживать изменение формы импульса (см. рис. 2б) при отклонении луча от центральной оси призмы. Но время расчета $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ многократно возрастает по сравнению с зеркальным приближением.

И, наконец, зная падающее поле, можно по аналитическим формулам [13] рассчитать рассеянное поле с учетом трансформации типа волны при падении плоской волны на БЦО и затем оценить поле на приемном элементе антенной решетки. При таком подходе можно рассчитать не только импульсы, отраженные от границы БЦО, но и импульсы обегания—соскальзывания, что делает такой подход самым точным. Однако время оценки $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \mathbf{v})$ еще больше увеличивается. А если учесть, что падающая на БЦО волна не плоская, и для точного решения задачи рассеяния понадобится разложить цилиндрическую волну на набор плоских волн, то это еще больше замедлит расчеты.

Расчет эхосигналов по всем трем вариантам для вариационной калибровки (зеркальное отражение, приближение Кирхгофа, точное аналитическое решение) не выявил принципиальной разницы между ними. Поэтому все результаты, представленные в статье, были получены по самому быстрому способу расчета рассеянного поля — по зеркальному приближению.

2.3. Проверка результатов калибровки

Проверка результатов калибровки заключалась в оценке точности определения координат границ БЦО диаметром 2 мм, расположенных на разных глубинах от 5 до 85 мм в образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2 из стали Ст20 по ЦФА-изображениям (рис. 3а). Для этого нужно, чтобы:

– геометрические размеры и скорости звука в образце для проверки были измерены с точностью не хуже $\pm 0,05$ мм и $\pm 0,01$ мм/мкс соответственно;

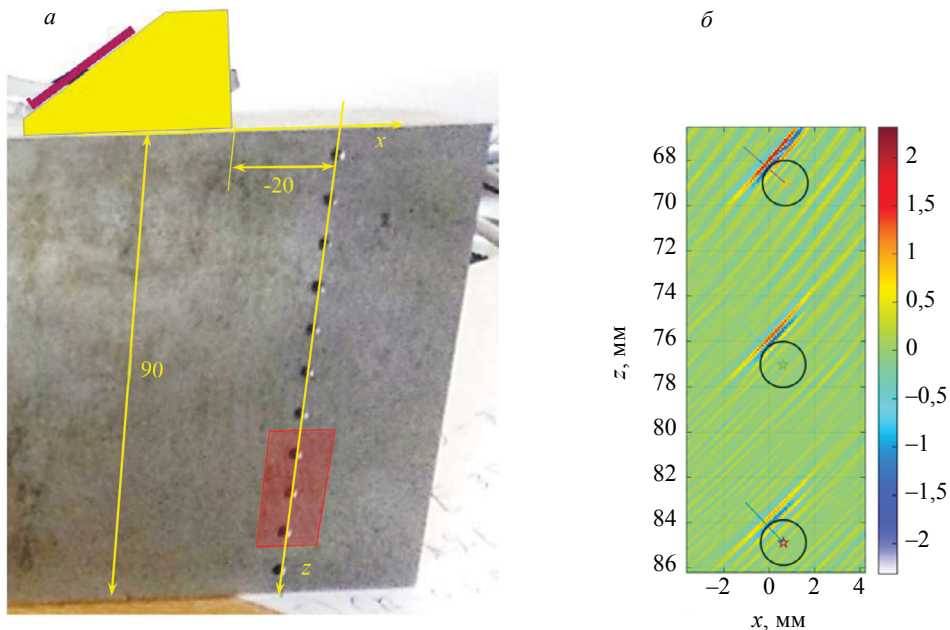


Рис. 3. Вид образца НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2 для проверки (а); фрагмент изображения в формате реального числа с контурами трех БЦО и контрольными линиями для получения среза блика границы (б).

– был обеспечен нормальный акустический контакт между антенной решеткой и призмой и между призмой и образцом;

– элементы антенной решетки должны быть параллельны оси БЦО, т.е. угол падения на БЦО в дополнительной плоскости должен стремиться к нулю.

На рис. 3б показан фрагмент ЦФА-изображения (выделен на рис. 3а четырехугольником с полупрозрачной розовой заливкой) в формате реального числа с контурами трех БЦО (окружности черного цвета) и контрольными линиями (тонкие линии черного цвета), вдоль которых формировался срез блика для анализа совпадения координат его максимума с известной границей БЦО.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КАЛИБРОВКИ И ПРОВЕРКИ

Для калибровки использовалась антенная решетка DP-5M32E1.0P (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,75 \times 10$ мм, зазор между краями пьезоэлементов 0,25 мм) и четыре призмы, паспортные параметры которых приведены в табл. 1. Стрелу призмы и путь в призме измерить довольно сложно, но измерить скорость звука и угол наклона призмы для сравнения с результатами калибровки достаточно просто. Для трех призм была измерена скорость продольной волны толщиномером Echotest 1076 Basic фирмы Karl Deutsch [19] с пьезопреобразователем на 4 МГц. Первая и четвертая призмы были сделаны из плексигласа, а вторая и третья — из рексолита. Для всех четырех призм с помощью угломера типа 2-2 0-320 гр. 2' ГОСТ 5378—88 180 с точностью $\pm 2'$ был измерен угол наклона. В табл. 1 в скобках приведены измеренные скорость продольной волны и угол наклона.

Таблица 1

Список используемых призм

	Тип призмы	Стрела, мм	Путь в призме, мм	Скорость продольной волны, мм/мкс	Угол наклона, град
1.	X-32-20	21,48	8,77	2,72	20,0 (20,37)
2.	X-32-17-R-L94W40	55,00	14,50	2,33 (2,332)	17,0 (17,00)
3.	X-32-39-R-IML52	23,67	20,94	2,33 (2,320)	39,0 (39,10)
4.	X-32-42-0-L117W40	65,00	37,00	2,72 (2,753)	42,0 (42,03)

На рис. 4 показаны схематические изображения призм с установленными на них антенными решетками для наглядного сравнения их геометрических параметров.

На рис. 5 схематически показаны положения призмы и антенной решетки при регистрации эхосигналов от БЦО в образце ISO 19675 PAUT BLOCK в двух положениях $x_w = 5$ и -15 мм. Существует оптимальное положение x_w призмы для калибровки, при котором регистрируются эхосигналы от всех четырех БЦО с минимальным разбросом амплитуды. На рис. 5 многоугольни-

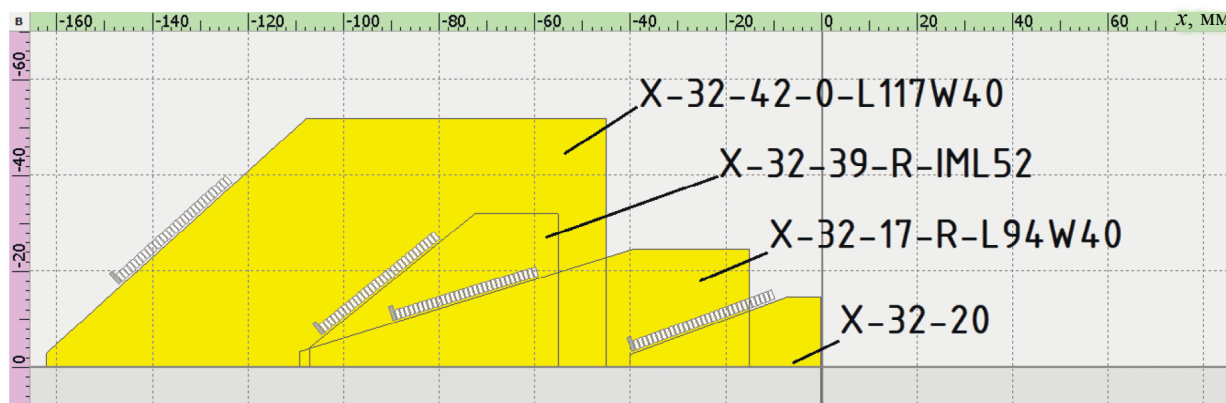


Рис. 4. Изображение призм, используемых для калибровки.

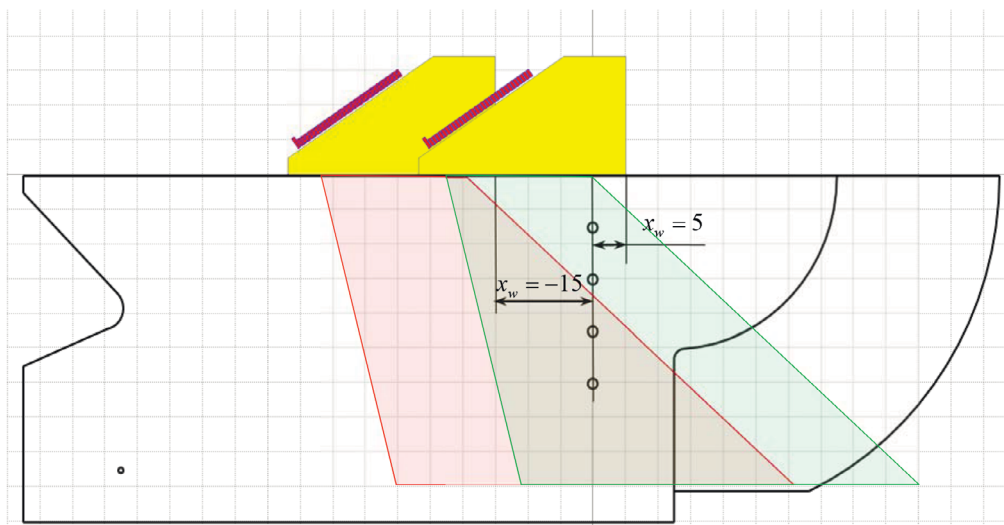


Рис. 5. Схема расположения призмы и антенной решетки в положении 5 и -15 мм при регистрации эхосигналов от четырех БЦО в образце ISO 19675 PAUT BLOCK.

ком с зеленой полупрозрачной заливкой схематически показана область с рабочим диапазоном углов антенной решетки при расположении призмы в точке $x_w = 5$ мм. При таком положении будут измерены эхосигналы от всех четырех БЦО. При размещении призмы в точке $x_w = -15$ мм эхосигналы от двух верхних БЦО (четыреугольник с полупрозрачной розовой заливкой) будут иметь маленькую амплитуду и качество калибровки ухудшится, так как амплитуда эхосигналов будет значимой только для двух нижних БЦО, т.е. для каждой призмы существует оптимальное положение призмы на образце $x_{w,opt}$ для измерения эхосигналов для калибровки.

Эксперимент по калибровке и проверки результатов вариационной калибровки проводился следующим образом:

1. Регистрировались эхосигналы от четырех БЦО в образце ISO 19675 PAUT BLOCK при трех положениях призмы, когда передняя грань находилась на расстояниях x_w , равным -15, -5 и 5 мм от центра БЦО (см. рис. 5). Такой выбор x_w определялся конструкцией специального упора для фиксации призмы с точностью ± 10 мкм.

2. Проводилась калибровка по эхосигналам, зарегистрированным в каждом из трех положений x_w .

3. Измерялись эхосигналы от одиннадцати БЦО на глубинах от 5 до 90 мм в образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2 при двух положениях передней грани призмы: -20 и 0 мм от центра БЦО. На рис. 3а антенная решетка схематически показана в положении -20 мм. Такие положения так же определялись конструкцией специального упора для фиксации призмы с точностью ± 10 мкм. Восстанавливались ЦФА-изображения для каждого положения антенной решетки при калибровке.

4. При проверке оценивалось смещение максимума блика от границ БЦО на ЦФА-изображениях, восстановленных по акустическим схемам на продольной (LdL) и поперечной (TdT) волнах так, как описано в разделе 2.3.

При каждой установке антенной решетки на призму результаты калибровки могут изменяться. Первая причина заключается в том, что винты, которыми корпус антенной решетки прижимается к призме, могут быть затянуты с разной силой. Поэтому корпус антенной решетки может оказаться перекошенным, и угол плоскости, в которой расположены ее элементы, будет отличаться от угла наклона призмы. Во-вторых, у установочных винтов резьба нарезана в дальней от головки части. В ближней к головке части у винта резьбы нет, а его диаметр уменьшен, что приводит к люфту около $\pm 0,2$ мм в крепежных отверстиях. Это означает, что при каждой установке возможен неконтролируемый сдвиг в пределах люфта антенной решетки на призме. Поэтому повторяемость измерений проверялась при проведении трех экспериментов согласно пунктам от 1 до 4. Перед каждым экспериментом антенная решетка откручивалась от призмы и прикручивалась обратно.

Таким образом, для проверки результатов вариационной калибровки анализировались блики одиннадцати БЦО в образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2 на тридцати шести ЦФА-изображениях:

- для трех положений призмы -15 , -5 и 5 мм при регистрации эхосигналов для калибровки на образце ISO 19675 PAUT BLOCK (см. рис. 5);
- при регистрации эхосигналов для проверки при расположении призмы в двух положениях: 0 и -20 мм (см. рис. 3а);
- по двум акустическим схемам на продольной (LdL) и поперечной (TdT) волнах;
- для трех экспериментов.

При проверке результатов упрощенной калибровки для расчета пути и угла наклона призмы этапы 1 и 2 были заменены на три измерения эхосигналов от подошвы призмы.

3.1. Определение параметров антенной решетки

Один из важных параметров, который нужно учитывать при восстановлении ЦФА-изображения отражателей, — это время задержки в протекторе. Учитывая, что толщина просветляющего протектора должна быть равна четверти длины волны, время задержки в протекторе равно четверти периода центральной частоты антенной решетки. Это означает, что без учета этого времени блики границ БЦО на ЦФА-изображении будут смещены по лучу на четверть периода. Для частоты $2,25$ МГц для продольной волны в стальном образце смещение будет равно $0,65$ мм. Это заметная величина при решении задачи дефектометрии. Способ определения времени задержки в протекторе приведен в статье [6].

4. НЕОБХОДИМАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Целесообразно определить оптимальное значение точности определения параметров призмы при калибровке, так как повышение точности приводит к усложнению измерений и обработки эхосигналов. При этом значительного повышения качества ЦФА-изображения не произойдет. Ошибка расчета времени задержки в половину периода может привести к тому, что амплитуда блика устремится к нулю. Если полагать, что максимальная ошибка может быть четверть периода, то эхосигналы уже не будут уничтожать друг друга, хотя не будет и оптимального сложения. Поэтому можно предложить такой принцип — для избегания взаимного погашения эхосигналов каждый искомый параметр призмы должен определяться так, чтобы ошибка во времени δt была до $1/4$ периода основной частоты, а ошибка по расстоянию δx была до $1/4$ длины волны. Учитывая, что измерения всех четырех параметров одновременно могут дать максимальную ошибку, то точность измерений целесообразно повысить хотя бы вдвое. Исходя из этого, можно полагать, что точность определения стрелы a_w и пути p_w в призме должна быть равна $\delta x = \lambda/8$, где λ — длина волны. Допустимое отклонение измеренного значения скорости звука $c_{w,l}$ можно оценить, исходя из того, что отклонение времени пробега δt по центральному лучу должно быть равно $1/8$ периода основной частоты. Эту величину можно оценить, как

$$\frac{p_w}{c_{w,l}} - \frac{p_w}{c_{w,l} - \delta c_{w,l}} = \delta t.$$

Простейшие преобразования позволяют оценить допустимое значение отклонения скорости $c_{w,l}$ по формуле:

$$\delta c_{w,l} = \frac{p_w}{p_w/c_{w,l} - \delta t} - c_{w,l}. \quad (2)$$

Допустимое отклонение угла наклона призмы $\delta\beta_w$ можно оценить, исходя из предположения, что смещение стрелы δx должно быть равно $1/8$ длины волны:

$$p_x \tan(\beta_w) - p_x \tan(\beta_w + \delta\beta_w) = \delta x, \text{ где } p_x = p_w \cos(\beta_w).$$

Из этого выражения, используя разложение тангенса в ряд Маклорена по $\delta\beta_w$, можно оценить $\delta\beta_w$, как

$$\delta\beta_w \approx \frac{\delta x}{p_w} \tan(\beta_w).$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по формулам (2) и (3) оптимальные точности при использовании антенной решетки с центральной несущей частотой 5 МГц для двух призм из табл. 1 — с самым маленьким путем p_w и с самым большим. При калибровке призмы с путем p_w , равным

Таблица 2

Оптимальная относительная точность определения параметров двух типов призм, %

	Тип призмы	$\frac{\delta a_w}{a_w}$	$\frac{\delta p_w}{p_w}$	$\frac{\delta c_{w,l}}{c_{w,l}}$	$\frac{\delta \beta_w}{\beta_w}$
1.	X-32-20	0,32 %	0,78 %	0,78 %	0,81 %
2.	X-32-42-0-L117W40	0,1 %	0,18 %	0,19 %	0,23 %

7 мм, требования к относительной точности вполне умеренные и находятся в пределах от 0,32 до 0,81 %. Для призмы с путем $p_w = 37$ мм требования к относительной точности более жесткие — они находятся в пределах от 0,1 до 0,23 %.

5. ВИД ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Предположим, что при расчетах скорость в призме $\hat{c}_{w,l}$ больше реальной $c_{w,l}$. Если путь в призме p_w пропорционально уменьшить, то время пробега по центральному лучу не изменится. А если увеличить угол наклона $\delta\beta_w$, то преломленный луч будет в точности совпадать с преломленным лучом при точно определенных параметрах призмы. Таким образом, для любой скорости продольной волны можно подобрать бесконечное число путей в призме и углов наклона призмы так, что время пробега по центральному лучу в призме и в объекте контроля не изменится. Это утверждение не справедливо для лучей от произвольной точки антенной решетки до места расположения БЦО, но разница времени пробега будет незначительна. По этой причине целевая функция $D(\mathbf{v})$ имеет овражистую структуру, которая тем ярче выражена, чем меньше размеры апертуры решетки. При нулевых размерах апертуры антенной решетки целевая функция вырождается в «траншею».

С помощью программы CIV4 [16] были рассчитаны эхосигналы от четырех БЦО с параметрами, как в образце ISO 19675 PAUT BLOCK, для призмы X-32-20 (см. табл. 1). Как упоминалось ранее, из-за наличия многих локальных минимумов целевой функции $D(\mathbf{v})$ приходится при заданном отклонении от паспортных параметров призмы использовать множество $\{\mathbf{v}\}$ из 24 начальных точек (окружности красного цвета на рис. 6). Паспортные значения параметров отмечены звездой желтого цвета. Найденные решения отмечены на рис. 6 окружностями или зеленого цвета, если они отличаются от паспортных значений меньше, чем 2 %, или синего цвета в противном случае. Только девять начальных точек дали решение близкое к правильному. Ромбом желтого цвета показано решение, рассчитанное как среднее значение решений, отмеченных окружностями зеленого цвета. На рис. 6а показаны начальные и конечные точки траектории поиска решения в плоскости «стрела — путь в призме» (а) и в плоскости «скорость звука — угол наклона» (б).

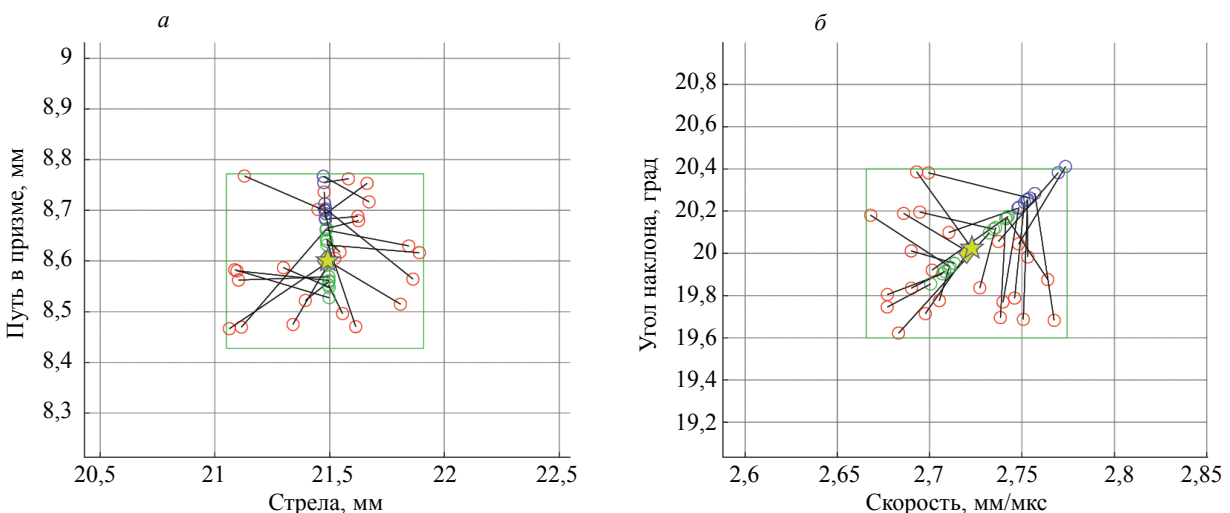


Рис. 6. Начальные и конечные точки траектории поиска решения в плоскости «стрела — путь в призме» (а) и в плоскости «скорость звука — угол наклона» (б).

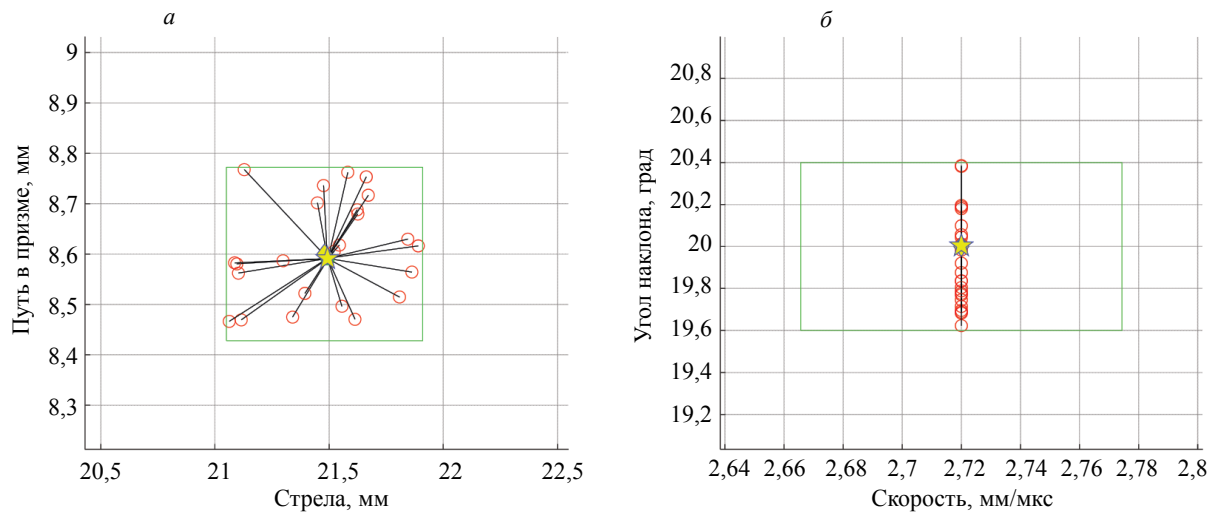


Рис. 7. Начальные и конечные точки траектории поиска решения в плоскости «стрела—путь в призме» (а) и в плоскости «скорость звука — угол наклона» (б) при исключении скорости продольной волны $c_{w,l}$ из искомых параметров призмы.

поиска решения в плоскости «стрела—путь в призме», а на рис. 6б — в плоскости «скорость звука—угол наклона». Из-за того, что целевая функция $D(\mathbf{v})$ при оптимизации по вектору $\mathbf{v} = (a_w, p_w, c_{w,l}, \beta_w)$ имеет овражистую структуру, относительная погрешность определения четырех неизвестных параметров равна 0,25 %. Это довольно грубая относительная погрешность при точно заданных параметрах численного эксперимента.

Если из списка параметров исключить скорость продольной волны в призме $c_{w,l}$ и задать ее значение, равное тому, что было при расчете эхосигналов, и искать минимум целевой функции $D(\mathbf{v})$ по трем параметрам $\mathbf{v} = (a_w, p_w, \beta_w)$, то относительная точность определения параметров уменьшилась в четыре раза — до 0,06 %. На рис. 7а показаны начальные и конечные точки траектории поиска решения в плоскости «стрела—путь в призме», а на рис. 7б — в плоскости «скорость звука—угол наклона». Видно, что в этом случае все решения сходятся в «точку». Массив точек начального приближения $\{\mathbf{v}\}$ такой же, что и при калибровке по четырем параметрам.

6. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Модельные эксперименты проводились с использованием дефектоскопа АВГУР—АРТ, разработанного и изготавливаемого в «Научно-производственном центре «ЭХО+» [20]. При проверке рассматривались только те БЦО, которые попадали в рабочий диапазон углов антенной решетки на призме. При оценке точности проверки полагалось, что длина продольной волны λ_l равна 1,18 мм ($\lambda_l/8 = 0,15$ мм), а длина поперечной волны λ_t равна 0,646 мм ($\lambda_t/8 = 0,08$ мм).

6.1. Призма Х-32-20 № 3

6.1.1. Вариационная калибровка

В табл. 3 приведены результаты калибровки призмы Х-32-20 и антенной решетки DP-5M32E1.0P. В графе «Отклонение» показано относительное отклонение среднего значения по отношению к паспортным (измеренным) параметрам, согласно табл. 1. Для данной призмы оптимальное положение при регистрации эхосигналов для калибровки равно $x_{w,opt} \approx -10$ мм. При положении призмы в точке $x_w = -5$ мм рассчитанный средний угол наклона призмы β_w отличается от результатов измерений всего на 0,08 %. Самое большое отклонение скорости продольной волны и пути в призме получилось при ее положении в точке $x_w = 5$ мм, когда эхосигналы от двух нижних БЦО имеют малую амплитуду из-за диаграммы направленности элементов антенной решетки и не сильно влияют на значения целевой функции $D(\mathbf{v})$. Тем не менее практически все значения угла и скорости находятся в пределах $\pm 0,5$ %, а значения пути в призме и стрелы откло-

Результаты калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-20

Смещение x_w , мм	Эксперимент	Стрела, мм	Путь, мм	Скорость, м/с	Угол, град
5	1	21,68	8,46	2,718	20,36
	2	21,73	8,45	2,718	20,28
	3	21,61	8,53	2,721	20,23
	Среднее	21,67	8,48	2,719	20,29
	Отклонение	0,90 %	-1,45 %	-0,04 %	-0,40 %
-5	1	21,69	8,45	2,714	20,36
	2	21,74	8,44	2,711	20,39
	3	21,61	8,49	2,711	20,32
	Среднее	21,68	8,46	2,712	20,35
	Отклонение	0,93 %	-1,66 %	-0,29 %	-0,08 %
-15	1	21,76	8,47	2,714	20,34
	2	21,70	8,45	2,710	20,31
	3	21,62	8,48	2,705	20,29
	Среднее	21,69	8,47	2,710	20,31
	Отклонение	1,00 %	-1,54 %	-0,38 %	-0,30 %

няются примерно на 1 и 1,5 % от паспортных параметров. Отметим, что результаты калибровки для третьего эксперимента заметно отличаются от двух первых. Возможные причины этого рассмотрены в разделе 3.

На рис. 8 в растровом виде показаны срезы реальной части ЦФА-изображений, восстановленных на продольных волнах (акустическая схема LdL), вдоль контрольных линий, отмеченных на рис. 3 линиями черного цвета, для каждого из одиннадцати БЦО в образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2, на котором проводилась проверка. При восстановлении ЦФА-изображений использовались результаты калибровки для первого эксперимента (см. табл. 3) при расположении призмы в точке $x_w = -5$ мм. На рис. 8а представлены изображения срезов бликов вдоль контрольных линий, как показано на рис. 3б, при размещении призмы в точке 0 мм на образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2, а на рис. 8б в точке -20 мм. Вертикальной линией красного цвета показано точное место границы БЦА, а звездочками красного цвета — максимальное значение среза блика БЦО вдоль контрольных линий, по которому можно определить координату границы БЦО. Для анализа выбирались блики тех БЦО, которые попадали в рабочий диапазон углов антенной решетки на призме. Максимальный

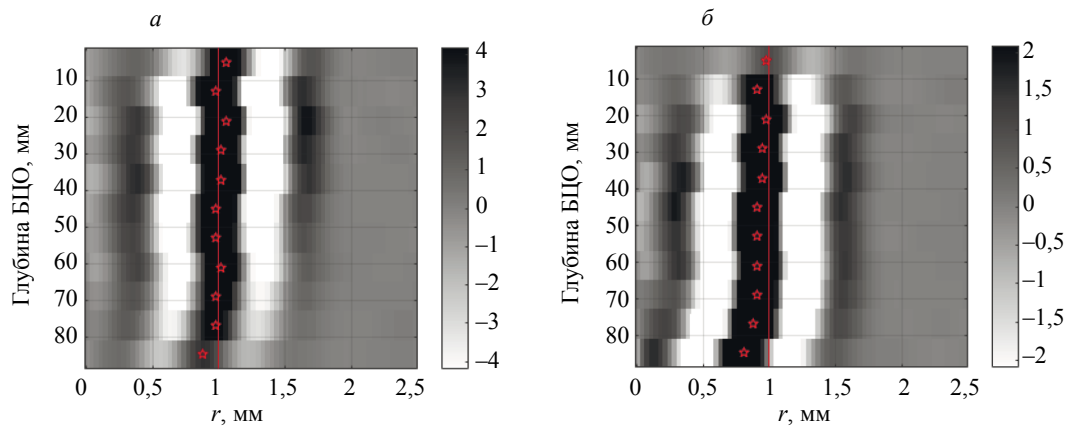


Рис. 8. Результаты проверки калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-20 по изображениям на продольной волне (LdL): при размещении призмы в точке 0 мм (а); в точке -20 мм (б).

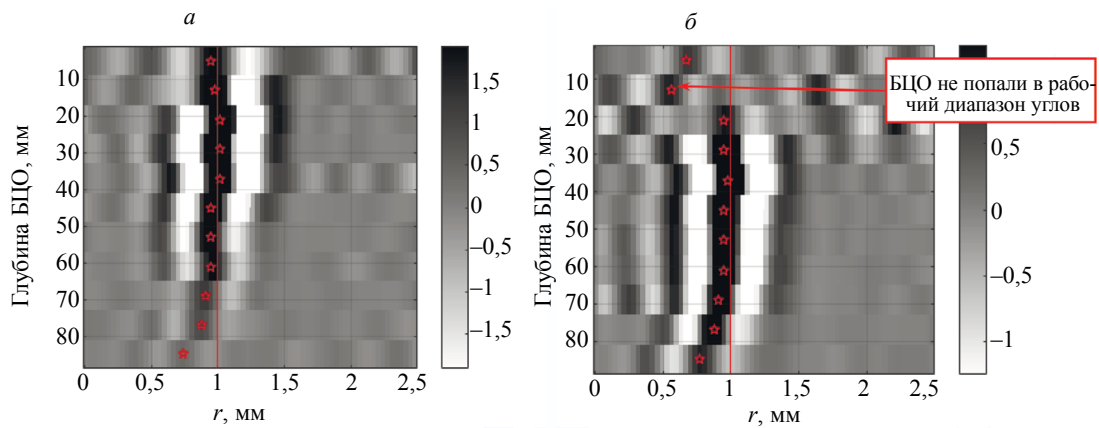


Рис. 9. Результаты проверки калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-20 по изображениям на поперечной волне (TdT): при размещении призмы в точке 0 мм (а); в точке –20 мм (б).

разброс значений ошибок равен $(-0,02; 0,05)$ мм при расположении призмы в точке 0 мм при проверке, а для положения –20 мм максимальный разброс ошибок равен $(-0,2; -0,02)$ мм. Максимальная ошибка получилась меньше, чем $1/6$ длины продольной волны.

На рис. 9 представлены результаты проверки калибровки по первому эксперименту при размещении призмы в точке $x_w = -5$ мм, но при восстановлении ЦФА-изображения на поперечной волне (акустическая схема TdT). Для восстановления ЦФА-изображения по акустическим схемам LdL и TdT использовались одни и те же измеренные эхосигналы. Для определения координат границ БЦО выбирались блики тех БЦО, которые попадали в рабочий диапазон углов антенной решетки на призме. Максимальный разброс значений ошибок равен $(-0,05; 0,02)$ мм при расположении призмы в точке 0 мм при проверке, а для положения –20 мм максимальный разброс ошибок равен $(-0,15; -0,03)$ мм. Диапазон ошибок получился меньше, чем $1/4$ длины поперечной волны. На рис. 9 видно, что из-за смещения призмы в положение –20 мм при проверке блики БЦО на глубинах 5 и 15 мм практически пропали из-за ограниченного рабочего диапазона углов антенной решетки.

Отклонения определения координаты границы БЦО для всех трех экспериментов, представленные в виде отклонения от среднего значения, следующие: для продольной волны $-0,06 \pm \pm 0,04$ мм, а для поперечной $-0,03 \pm 0,025$ мм. Точность определения координат БЦО составила величину порядка $1/4$ длины волны.

6.1.2. Упрощенная калибровка

В табл. 4 представлены результаты определения пути и угла призмы в предположении, что скорость продольной волны в призме равна 2,720 мм/мкс. Видно, что рассчитанное значение угла β_w очень близко к измеренному (см. табл. 1), но среднее значение пути p_w примерно на 0,1 мм больше, чем при вариационной калибровке (см. табл. 3).

Проверка результатов калибровки проводилась при паспортных значениях стрелы, равной 21,48 мм, и скорости продольной волны в призме, равной 2,720 мм/мкс, для двух положений при-

Таблица 4

Результаты упрощенной калибровки призмы X-32-20

Эксперимент	Путь, мм	Угол, град
1	8,63	20,30
2	8,51	20,40
3	8,56	20,40
Среднее	8,57	20,37
Отклонение	-0,39 %	-0,02 %

змы 0 и –20 мм на образце НО-Ф2-П90-ПЛ-Б2, как описано в разделе 6.1.1. Отклонения определения координаты границы БЦО для трех экспериментов следующие: для продольной волны $0,09 \pm 0,16$ мм, а для поперечной $0,03 \pm 0,09$ мм.

По сравнению с результатом вариационной калибровки ошибка определения координат отражателей ухудшилась примерно до $1/2$ длины волны.

6.2. Призма X-32-17-R-L94W40

6.2.1. Вариационная калибровка

В табл. 5 приведены результаты калибровки призмы X-32-17-R-L94W40 и антенной решетки DP-5M32E1.0P. Для данной призмы оптимальное положение при регистрации эхосигналов для калибровки равно $x_{w,opt} \approx 20$ мм, поэтому результаты калибровки при расположении призмы в точках –15 и –5 мм должны быть хуже, чем при расположении призмы в точке $x_w = 5$ мм. Тем не менее определенная скорость продольной волны в призме для трех экспериментов имеет разброс меньше $\pm 0,06$ %. А вот отличие угла наклона призмы β_w , полученного в результате калибровки и при измерении угломером, на 0,5 % остается непонятным. Определенные значения стрелы и пути для третьего эксперимента отличаются от первых двух. Возможные причины этого рассмотрены в разделе 3.

Таблица 5

Результаты калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-17-R-L94W40

Смещение x_w , мм	Эксперимент	Стрела, мм	Путь, мм	Скорость, м/с	Угол, град
5	1	54,78	14,64	2,332	17,09
	2	54,79	14,63	2,333	17,09
	3	54,90	14,59	2,333	17,08
	Среднее	54,82	14,62	2,333	17,09
	Отклонение	–0,32 %	0,83 %	0,03 %	0,51 %
–5	1	54,68	14,66	2,330	17,06
	2	54,68	14,68	2,334	17,09
	3	54,80	14,60	2,328	17,06
	Среднее	54,72	14,65	2,331	17,07
	Отклонение	–0,51 %	1,01 %	–0,06 %	0,41 %
–15	1	54,57	14,65	2,322	17,00
	2	54,59	14,72	2,334	17,10
	3	54,90	14,66	2,337	17,14
	Среднее	54,69	14,68	2,331	17,08
	Отклонение	–0,57 %	1,22 %	–0,04 %	0,47 %

Отклонение измеренных координат границы БЦО для трех экспериментов следующие: для продольной волны составляет $-0,06 \pm 0,13$ мм, а для поперечной — $-0,01 \pm 0,17$ мм. После вариационной калибровки точность определения координат отражателей составляет величину порядка $1/4$ длины волны. Если при проверке убрать из рассмотрения результаты калибровки в положении $x_w = -15$ мм, то ошибка определения координат границы БЦО уменьшается примерно на 30 %.

6.2.2. Упрощенная калибровка

В табл. 6 представлены результаты определения пути и угла призмы в предположении, что скорость продольной волны в призме равна 2,33 мм/мкс. Видно, что рассчитанное в результате

Таблица 6

Результаты упрощенной калибровки призмы X-32-17-R-L94W40

Эксперимент	Путь, мм	Угол, град
1	14,81	17,10
2	14,84	17,10
3	14,77	17,10
Среднее	14,81	17,10
Отклонение	2,11 %	0,59 %

упрощенной калибровки значение угла β_w отличается от измеренного угломером (см. табл. 1) на 0,6 %.

Отклонения определения координаты границы БЦО для трех экспериментов следующие: для продольной волны составляет $0,58 \pm 0,16$ мм, а для поперечной — $0,38 \pm 0,16$ мм. По сравнению с результатом вариационной калибровки точность определения координат отражателей ухудшилась примерно до $1/2$ длины волны.

6.3. Призма X-32-39-R-IML52

6.3.1. Вариационная калибровка

В табл. 7 приведены результаты калибровки призмы X-32-20 и антенной решетки DP-5M32E1.0P. Для данной призмы оптимальное положение при регистрации эхосигналов для калибровки равно $x_{w,opt} \approx -15$ мм. Поэтому точность определения наклона призмы β_w при положении призмы в точке -15 мм отличается меньше, чем на $\pm 0,1$ % от измеренных угломером, а в положении 5 мм меньше, чем $-0,3$ %. Отметим, что результаты калибровки для первого эксперимента заметно отличаются от второго и третьего. Возможные причины этого различия рассмотрены в разделе 3.

Таблица 7

Результаты калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-39-R-IML52

Смещение x_w , мм	Эксперимент	Стрела, мм	Путь, мм	Скорость, м/с	Угол, град
5	1	24,05	20,89	2,341	39,05
	2	23,87	20,87	2,329	38,90
	3	23,90	20,94	2,337	39,04
	Среднее	23,94	20,90	2,336	39,00
	Отклонение	1,14 %	-0,18 %	0,68 %	-0,27 %
-5	1	24,07	20,80	2,333	38,99
	2	23,85	20,90	2,332	39,02
	3	23,90	20,93	2,335	39,08
	Среднее	23,94	20,88	2,333	39,03
	Отклонение	1,14%	-0,29%	0,56%	-0,18%
-15	1	24,13	20,87	2,341	39,18
	2	23,93	20,89	2,334	39,10
	3	23,96	20,92	2,335	39,11
	Среднее	24,00	20,89	2,337	39,13
	Отклонение	1,41 %	-0,22 %	0,72 %	0,08 %

Отклонение измеренных координат границы БЦО для трех экспериментов следующие: для продольной волны составляет $0,05 \pm 0,09$ мм, а для поперечной — $0,05 \pm 0,01$ мм. После вариацион-

ной калибровки точность определения координат отражателей составляет величину порядка $1/4$ длины волны.

6.3.2. Упрощенная калибровка

В табл. 8 представлены результаты определения пути и угла призмы в предположении, что скорость продольной волны в призме равна $2,32$ мм/мкс. Видно, что рассчитанное значение угла β_w отличается на $-0,85$ % от значения угла, измеренного угломером (см. табл. 1).

Таблица 8

Результаты упрощенной калибровки призмы X-32-39-R-IML52

Эксперимент	Путь, мм	Угол, град
1	21,06	38,80
2	21,13	38,80
3	21,07	38,70
Среднее	21,09	38,77
Отклонение	0,70 %	-0,85 %

Отклонение измеренных координат границы БЦО для трех экспериментов следующие: для продольной волны составляет $0,502 \pm 0,073$ мм, а для поперечной — $0,193 \pm 0,06$ мм. По сравнению с результатом вариационной калибровки точность определения координат отражателей ухудшилась примерно до $1/2$ длины волны.

6.4. Призма X-32-42-0-L117W40

Из-за большого угла наклона призмы ЦФА-изображения на продольной волне получились низкого качества и поэтому не анализировались.

6.4.1. Вариационная калибровка

В табл. 9 приведены результаты калибровки призмы X-32-42-0-L117W40 и антенной решетки DP-5M32E1.0P. Для данной призмы со стрелой, равной 65 мм, оптимальное положение при регистрации эхосигналов для калибровки равно $x_{w,opt} \approx 20$ мм. Результаты измерений угла наклона при положении призмы в точке 5 мм отличается меньше, чем на $\pm 0,25$ % от измеренных угломером. Определенная скорость продольной волны в призме равна примерно $2,735$ мм/мкс против $2,753$ мм/мкс, полученных стандартным толщиномером. Результат измерения скорости толщиномером представляется завышенным, так как в плексиглазе коэффициент затухания возрастает с увеличением частоты, и на расстоянии в 30 мм передний фронт импульса увеличивается. Путь в призме и стрела более чем на $0,5$ % отличаются от паспортных значений.

Отклонение определения координат границ БЦО для трех экспериментов составляет величину $0,14 \pm 0,16$ мм. После калибровки точность определения координат отражателей составляет величину порядка $1/3$ длины волны.

6.4.2. Упрощенная калибровка

В табл. 10 представлены результаты определения пути и угла призмы в предположении, что скорость продольной волны в призме равна $2,72$ мм/мкс. Видно, что рассчитанное значение угла отличается на -2 % от угла, измеренного угломером (см. табл. 1).

Отклонение измеренных координат границы БЦО для трех экспериментов равно $-0,77 \pm \pm 0,076$ мм. По сравнению с результатом вариационной калибровки ошибка увеличилась примерно в пять раз, а точность определения координат отражателей уменьшилась примерно до длины волны.

Таблица 9

Результаты калибровки антенной решетки DP-5M32E1.0P на призме X-32-42-0-L117W40

Смещение $x_{\text{н}}$, мм	Эксперимент	Стрела, мм	Путь, мм	Скорость, м/с	Угол, град
5	1	65,24	36,72	2,734	41,90
	2	65,26	36,69	2,731	41,87
	3	65,31	36,77	2,737	42,03
	Среднее	65,27	36,73	2,734	41,93
	Отклонение	0,42 %	-0,74 %	-0,69 %	-0,23 %
-5	1	65,21	36,74	2,735	41,87
	2	65,26	36,77	2,736	41,98
	3	65,30	36,64	2,725	41,79
	Среднее	65,26	36,72	2,732	41,88
	Отклонение	0,39 %	-0,77 %	-0,76 %	-0,36 %
-15	1	65,17	36,68	2,721	41,87
	2	65,30	36,78	2,739	42,06
	3	65,28	36,73	2,730	41,92
	Среднее	65,25	36,73	2,730	41,95
	Отклонение	0,38 %	-0,73 %	-0,84 %	-0,19 %

Таблица 10

Результаты упрощенной калибровки призмы X-32-42-0-L117W40

Эксперимент	Путь, мм	Угол, град
1	36,14	41,10
2	36,15	41,20
3	36,13	41,20
Среднее	36,14	41,17
Отклонение	-2,32 %	-2,05 %

7. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВАРИАЦИОННОЙ И УПРОЩЕННОЙ КАЛИБРОВОК

На рис. 10 представлены результаты проверки на продольной (*a*) и поперечной (*b*) волне результатов вариационной и упрощенной калибровок четырех призм (см. табл. 1). ЦФА-изображения на продольной волне для призмы X-32-42-0-L117W40 из-за большого угла наклона низкого качества и поэтому не анализировались. Сплошными линиями показаны результаты, полученные для вариационной калибровки, а пунктирными — для упрощенной, утолщенными линиями показаны средние значения ошибки, а тонкими — разброс от средних значений, сплошными линиями черного цвета показаны уровни $\pm\lambda/4$ и $\pm\lambda/4$. При проверке результатов вариационной и упрощенной калибровки на продольной волне (см. рис. 10*a*) близкими получились только средние значения для призмы X-32-17-R-L94W40, но зато для упрощенной калибровки разброс примерно в три раза больше. Для призм X-32-20 и X-32-39-R-IML52 среднее значение для упрощенной калибровки оказались более, чем в пять раз хуже при примерно одинаковом разбросе. Ошибки определения координат границ БЦО для вариационной калибровки уверенно попали в диапазон $\pm\lambda/4$.

При проверке на поперечной волне средние значения и разброс для вариационной калибровки в целом попали в диапазон $\pm\lambda/4$. Довольно хороший результат упрощенная калибровка дала для призм X-32-17-R-L94W40 и X-32-39-R-IML52. Однако в сравнении с вариационной калибровкой у упрощенной калибровки более чем в три раза больше разброс. Особенно большая ошибка сред-

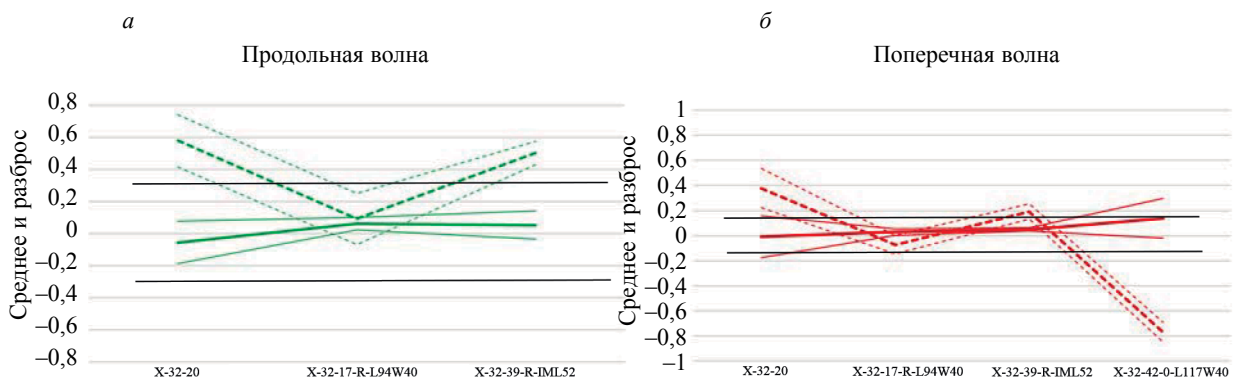


Рис. 10. Результаты проверки калибровки на продольной (а) и поперечной (б) волне при вариационной и упрощенной калибровке всех призм.

него значения получилась при проверке упрощенной калибровки для призмы X-32-42-0-L117W40. Это связано с большим углом наклона призмы, что приводит к искажению формы импульсов, отраженных от дна (см. рис. 2б).

8. ВЫВОДЫ

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

1. Для повышения эффективности процедуры вариационной калибровки нужно выбирать оптимальное положение призмы $x_{и,опт}$ так, чтобы эхосигналы от всех четырех БЦО образца ISO 19675 PAUT BLOCK имели по возможности близкие амплитуды.

2. При вариационной калибровке пары «путь—скорость звука» и «наклон—скорость звука» формируют овражистую структуру целевой функции. Поэтому целесообразно исключить скорость звука из определяемых параметров при использовании вариационной калибровки. Для этого можно на этапе изготовления призм проводить измерения скорости продольной волны в заготовке.

3. При проверке результатов вариационной калибровки и среднее значение ошибки определения координат границ БЦО, и ее размах в целом попадают в диапазон в четверть длины волны как для продольной, так и поперечной волны.

4. При проверке результатов упрощенной калибровки среднее значение ошибки определения координат границ БЦО и ее размах в целом попадают как для продольной, так и поперечной волны в диапазон в половину длины волны. Исключение составляет калибровка антенной решетки на призме X-32-42-0-L117W40.

5. Вариационная и упрощенная калибровка антенной решетки на призме встроены в программное обеспечение системы ультразвукового контроля АВГУР АРТ.

6. Повысить точность вариационной калибровки можно за счет расчета эхосигналов по разным акустическим схемам с учетом трансформации типа волны на БЦО, например, LdL, LdT, TdL и TdT.

7. Вариационная калибровка дает более точный и стабильный результат для призм с разными углами, чем упрощенная калибровка. Однако вычислительные затраты при проведении вариационной калибровки более чем на три порядка превышают затраты на упрощенную калибровку. По результатам упрощенной калибровки можно уточнить значение стрелы призмы добиваясь совпадения границ бликов БЦО с известным положением границ, изменяя стрелу. Но дополнительные измерения потребует времени, что может привести к тому, что полное время вариационной и упрощенной калибровки будут соизмеримыми.

8. На практике при проведении ультразвукового контроля по методикам, определяющих дефект по превышении амплитуды блика контрольного уровня, вполне хватит упрощенной калибровки. Однако при решении задач дефектометрии, когда нужно максимально точно определить координаты и размеры отражателя при использовании различных акустических схем и при размещении двух антенных решеток с обеих сторон сварного соединения, целесообразно пользоваться вариационной калибровкой как более точной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-084-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-07122015-n-502-ob/np-084-15/> (дата обращения: 07.02.2024).
2. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications* / Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 07.02.2024).
3. *Базулин Е.Г.* Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками // *Дефектоскопия*. 2014. № 3. С. 12—22.
4. Проблемы износа ультразвуковых преобразователей и способы их решения для фазированных решеток. URL: <https://techkontrol.ru/stati/problemy-iznosa-ultrazvukovykh-preobrazovateley-i-sposoby-ikh-resheniya-dlya-fazirovannykh-reshetok> (дата обращения 07.02.2024).
5. ISO 19675:2017 Non-destructive testing Ultrasonic testing Specification for a calibration block for phased array testing (PAUT). URL: <https://www.iso.org/standard/65991.html> (дата обращения 07.02.2024).
6. *Базулин Е.Г.* Калибровка ультразвуковой антенной решётки, установленной на призму // *Дефектоскопия*. 2014. № 4. С. 50—63.
7. *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
8. *Крохмаль А.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А.* Создание эталонной плоской ультразвуковой волны в жидкости с помощью плоского пьезоэлектрического преобразователя большого волнового размера // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 5. С. 475—488.
9. *Kullback S., Leibler R.A.* On information and sufficiency // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1951. V. 22. № 1. P. 79—86.
10. *Болотникова О.В., Тарасов Д.В., Тарасов Р.В.* Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность / Учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 84 с.
11. *Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г.* Методы стохастической оптимизации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 67 с.
12. *Xiao Fu, Wangsheng Liu, Bin Zhang, Hua Deng.* Quantum Behaved Particle Swarm Optimization with Neighborhood Search for Numerical Optimization // *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. V. 2013. Art. ID 469723. 10 p.
13. *Голубев А.С.* Отражение плоских волн от цилиндрического дефекта // *Акустический журнал*. 1961. Т. VII. № 2. С. 174—180.
14. *Данилов В.Н.* Расчеты акустических трактов наклонных преобразователей в ультразвуковой дефектоскопии. М.: Издательский дом «Спектр», 2021. 182 с.: ил.
15. *Ямицков В.С., Данилов В.Н.* Об отражении продольных и поперечных упругих волн от цилиндрической полости в полупространстве // *Дефектоскопия*. 1984. № 4. С. 3—11.
16. Официальный сайт фирмы EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (дата обращения: 07.02.2024).
17. *Achenbach J.D., Brind R.J., Gubernatis J.E.* High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities // *Wave Motion* 6. North-Holland. 1982. P. 41—60.
18. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики / Пер. с англ. Изд. 2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
19. Официальный сайт компании Karl Deutsch. URL: <https://karldeutsch.ru/> (дата обращения 07.02.2024).
20. Официальный сайт фирмы «ЭХО+». URL: <https://echoplus.ru/> (дата обращения: 07.02.2024).

REFERENCES

1. NP-084-15. Federal norms and rules in the field of atomic energy use Rules of control of base metal, welded joints and welded surfaces during operation of equipment, pipelines and other elements of nuclear power plants. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-07122015-n-502-ob/np-084-15/> (accessed 07.02.2024).
2. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications* / Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (accessed 07.02.2024).
3. *Bazulin E.G.* Determination of the reflector type by the image reconstructed from the echoes measured by ultrasonic antenna arrays // *Defectoscopy*. 2014. № 3. P. 12—22.
4. Wear problems of ultrasonic transducers and their solutions for phased arrays. URL: <https://techkontrol.ru/stati/problemy-iznosa-ultrazvukovykh-preobrazovateley-i-sposoby-ikh-resheniya-dlya-fazirovannykh-reshetok> (accessed 07.02.2024).
5. ISO 19675:2017 Non-destructive testing Ultrasonic testing Specification for a calibration block for phased array testing (PAUT). URL: <https://www.iso.org/standard/65991.html> (accessed 07.02.2024).
6. *Bazulin E.G.* Calibration of an ultrasonic antenna array mounted on a prism // *Defectoscopy*. 2014. № 4. P. 50—63.

7. *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.
8. *Krokhmal A.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Sapozhnikov O.A.* Creation a reference plane ultrasonic wave in a fluid using a plane piezoelectric transducer with a large wave dimension // *Acoustical Physics*. 2020. V. 66. № 5. P. 475—488.
9. *Kullback S., Leibler R.A.* On information and sufficiency // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1951. V.22. № 1. P. 79—86.
10. *Bolotnikova O.V., Tarasov D.V., Tarasov R.V.* Linear programming: simplex method and duality: study guide. Penza: PSU Publishing House, 2015. P. 84.
11. *Matrenin P.V., Grif M.G., Sekaev V.G.* Methods of stochastic optimization. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2016. 67 p.
12. *Xiao Fu, Wangsheng Liu, Bin Zhang, Hua Deng.* Quantum Behaved Particle Swarm Optimization with Neighborhood Search for Numerical Optimization // *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. V. 2013. Article ID 469723. 10 p.
13. *Golubev A.S.* Reflection of plane waves from a cylindrical defect // *Acoustic Journal*. 1961. V. VII. № 2. P. 174—180.
14. *Danilov V.N.* Calculations of acoustic paths of inclined transducers in ultrasonic flaw detection. M.: «Spectrum» Publishing House, 2021. 182 p.
15. *Yamshchikov V.S., Danilov V.N.* About reflection of longitudinal and transverse elastic waves from a cylindrical cavity in a half-space // *Defectoscopya*. 1984. № 4. P. 3—11.
16. Official website of the company EXTENDE. URL: <http://www.extende.com/> (accessed 07.02.2024).
17. *Achenbach J.D., Brind R.J., Gubernatis J.E.* High-frequency scattering of elastic waves from cylindrical cavities // *Wave Motion* 6. North-Holland. 1982. P. 41—60.
18. *Born M., Wolf E.* Principles of optics / Transl. from engl. ed. 2, revision. M.: Science, 1973. 720 p.
19. Official website of the company Karl Deutsch. URL: <https://karldeutsch.ru/> (accessed 07.02.2024).
20. Official website of the company «ECHO+». URL: <https://echoplus.ru/> (accessed 07.02.2024).