

УДК 621.179

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕННЫХ ПРОТЕКТОРОВ ДЛЯ НАКЛОННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

A. С. ГОРДЕЕВА, С. С. СЕРГЕЕВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.179

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF REPLACEABLE PROTECTORS FOR INCLINED ULTRASONIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

A. S. GORDEYEVA, S. S. SERGEEV

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения сменных протекторов из полимерных материалов с различной кривизной контактной поверхности для стандартных наклонных ультразвуковых пьезопреобразователей.

Ключевые слова: дефектоскопия, протекторы, ультразвуковой метод контроля, наклонные ультразвуковые пьезопреобразователи, кривизна контактной поверхности.

Abstract. We present the results of experimental research into the effectiveness of using interchangeable protectors made of different materials with different curvature of the contact surface for standard inclined ultrasonic piezoelectric transducers.

Keywords: flaw detection, ultrasonic testing method, ultrasonic piezoelectric transducers curvature of the contact surface.

Ультразвуковой контроль материалов и изделий обеспечивает на сегодняшний день наиболее высокую достоверность, производительность и информативность при выявлении дефектов. Традиционными объектами контроля в энергетике, нефтехимической отрасли и в машиностроении являются металлические прутки и трубы различного типоразмера по диаметру и толщине стенок. Все эти объекты отличаются кривизной поверхности и требуют применения специальных приемов обеспечения качественного акустического контакта с ультразвуковыми преобразователями.

В соответствии с нормативными документами на ультразвуковой контроль объектов типа труб или прутков (ГОСТ Р 55724–2013, ГОСТ Р ИСО 16811–2016 и др.) в практике необходима притирка призмы наклонных ПЭП до кривизны объекта, благодаря чему достигается стабильный акустический контакт притертой поверхности при минимальной толщине смазки. Таким образом, для эффективной работы дефектоскопистам необходимо иметь для каждого диаметра из огромного разнообразия объектов отдельный притертый ПЭП, что очень дорого обходится для лабораторий неразрушающего контроля.

Для решения указанной проблемы предлагается использование сменных насадок-протекторов и стандартных ПЭП с плоской контактной поверхностью [1]. Целью исследований является выбор вариантов настройки чувстви-

тельности по различным образцам и введение поправок при осуществлении контроля реальных объектов.

При проведении экспериментов использовались ультразвуковой дефектоскоп USM Go и наклонные преобразователи производства SIUI с рабочей частотой 2,5 и 5 МГц, с углами наклона призмы 50°, 65° и 70°. Используемые модели преобразователей данного производителя имеют одинаковую форму поверхности и геометрические размеры.

Для проведения исследований при помощи программы Компас-3D V16 были подготовлены 3D-модели протекторов различной кривизны контактных поверхностей (98, 102, 108, 159 мм) для контроля труб соответствующих наружных диаметров, а также плоскодонные протекторы для определения величины поправок, вносимых при настройке прибора. Форма протектора выбиралась такой, чтобы обеспечивалось хорошее крепление на преобразователе с минимальными зазорами. По полученным 3D-моделям эти протекторы (рис. 1) были изготовлены на 3D-принтерах. При изготовлении протекторов были использованы два принтера с различными смолами в качестве фотополимерных материалов (табл. 1) [1].

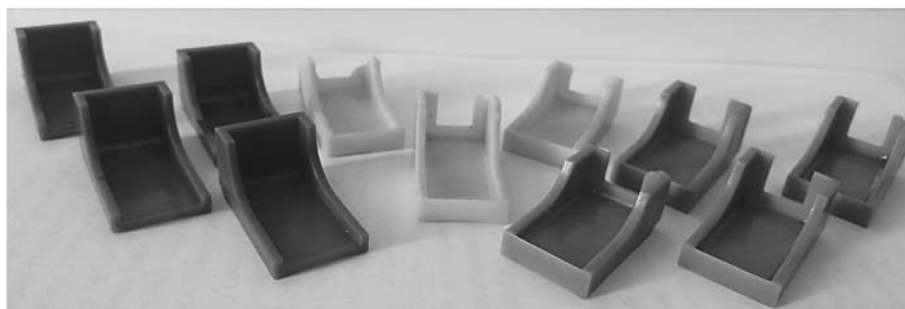


Рис. 1. Протекторы из различных материалов с кривизной контактных поверхностей 98, 102, 108, 159 мм

Табл. 1. 3D-принтеры и фотополимеры, использованные в них

Модель принтера	Фотополимерный материал	Название протектора из соответствующего материала
Medit T 510	Photopolymer Grey Pro Resin flpr gro1	Серый
Anycubic Photon Mono X	Anycubic 3D Printing UV Sensitive Resine Basic Grey	Синий
	Gorky Liquid Detal Model LCD/DPL	Бежевый

Для расчетной оценки чувствительности преобразователей с протектором проведено теоретическое моделирование акустического тракта для объекта с различными искусственными дефектами.

Формулы акустического тракта позволяют определить ослабление амплитуды ультразвукового сигнала на пути источник – дефект – приёмник. При выполнении расчетов принимаем, что реальный дефект – это отражатель

правильной формы. В сварных швах возможны дефекты в виде пор, разнонаправленных трещин и непроваров в корне шва. Данные дефекты моделируются сферой, диском и двугранным углом соответственно [2].

Рассмотрим объект с толщиной основного металла 12 мм с отражателем в форме бесконечно тонкого диска. Расчетная схема обнаружения отражателя преобразователем с протектором представлена на рис. 2. Это случай акустического тракта, когда приемник и излучатель совмещены. Модель в виде тонкого диска считается направленным отражателем. Угол ввода 65° , толщина протектора 1 мм, частота 2,5 МГц.

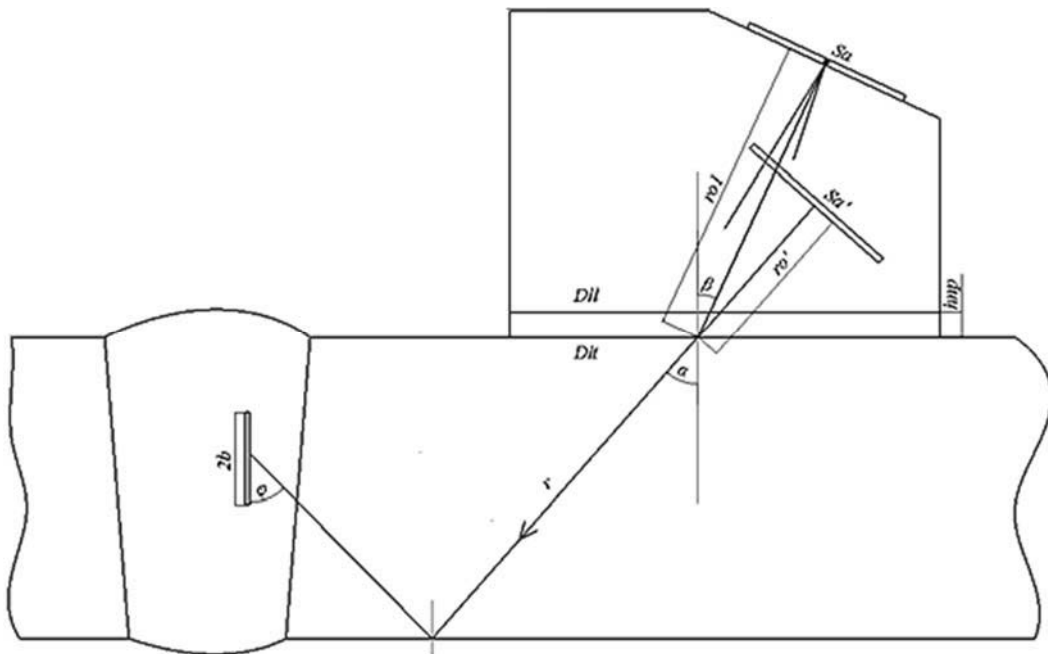


Рис. 2. Схема обнаружения отражателя преобразователем с протектором

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для бесконечно тонкого диска принимает вид [2]

$$\frac{P}{P_0} = \frac{R_t \cdot D_{lt} \cdot D_{ll} \cdot S_a \cdot \pi \cdot b^2 \cdot \cos \alpha}{\lambda_t^2 \cdot (r + r_0')^2 \cdot \cos \beta} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)},$$

где α – угол ввода, $\alpha = 65^\circ$; β – угол призмы, $\beta = 49,4^\circ$; b – радиус дефекта ($1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $2 \cdot 10^{-3}$ м; $2,5 \cdot 10^{-3}$ м); S_a – площадь пьезопластины ($3,14 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2$ м); r – длина пути ультразвука от точки выхода луча до дефекта, $r = 25 \dots 50$ мм; λ_t – длина волны ультразвука в объекте, $\lambda_t = 1,28$ мм; D_{lt} – коэффициент прохождения через границу раздела призма – объект, $D_{lt} = 0,2$; R_t – коэффициент отражения от поверхности дефекта, $R_t = 1$; δ_{np} – коэффициент затухания в материале призмы, $\delta_{np} = 58$ 1/м; r_0 – средний путь ультразвука в призме

преобразователя, $r_0 = 10$ мм; r'_0 – приведенный путь ультразвука в призме преобразователя; δ – коэффициент затухания в материале объекта, $\delta = 4$ 1/м; D_{ll} – коэффициент прохождения через границу призма – протектор, $D_{ll} = 0,8$; δ_{nm} – коэффициент затухания в материале протектора, $\delta_{nm} = 46$ 1/м; h_{nm} – толщина протектора, $h_{nm} = 1$ мм.

Приведенный путь ультразвука в призме преобразователя в этом случае примет вид

$$r'_0 = r_{01} \frac{C_{l1}}{C_{l2}} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \frac{h_{nm}}{\sin \alpha}.$$

Если размер отражателя 2 мм, а длина пути ультразвука от точки выхода луча до него 0,035 м, можно определить теоретическую поправку к чувствительности в децибелах, которую необходимо учитывать при использовании протектора. Величина поправки в данном случае равна разности 1–2 (рис. 3).

Таким образом, используя данные, приведенные на рис. 3, можно определить поправки к чувствительности для контроля дисковых отражателей 1,5; 2 и 2,5 мм.

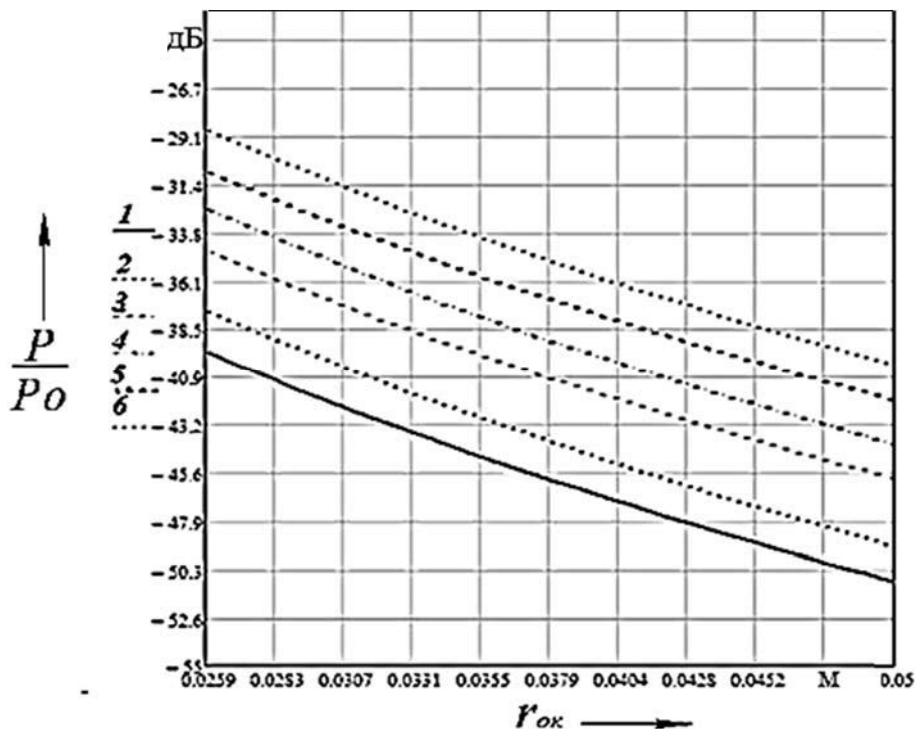


Рис. 3. Зависимость чувствительности от размера дефекта и длины пути ультразвука от точки выхода луча до дискового отражателя: 1 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм с протектором; 2 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм без протектора; 3 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм с протектором; 4 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора; 5 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2,5 мм с протектором; 6 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для сферического отражателя принимает вид (рис. 4)

$$\frac{P}{P_0} = \frac{D_{ll} \cdot D_{lt} \cdot S_a \cdot b \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \lambda_t \cdot (r + r'_0)^2 \cdot \cos \beta} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)}$$

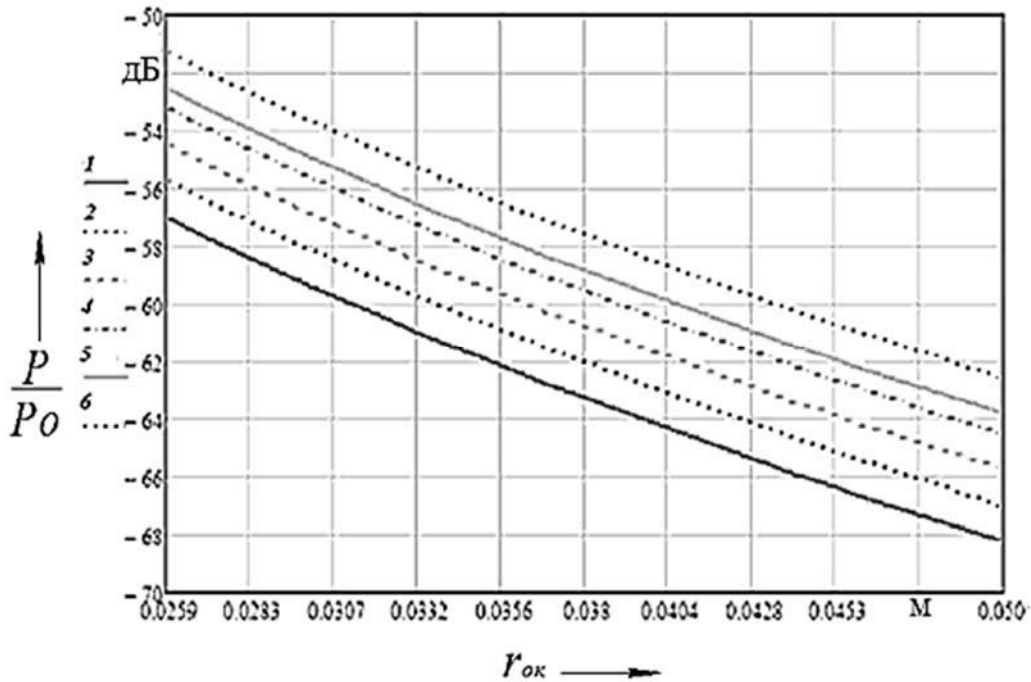


Рис. 4. Зависимость чувствительности от размера дефекта и длины пути ультразвука от точки выхода луча до сферического отражателя: 1 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм с протектором; 2 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 1,5 мм без протектора; 3 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм с протектором; 4 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора; 5 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2,5 мм с протектором; 6 – P/P_0 при контроле дискового отражателя 2 мм без протектора

Рассмотрим объект с отражателем в форме двугранного угла, моделирующего непровар в корне шва. Данный отражатель можно заменить полосой, т. к. обычно подобные непровары являются протяженными по отношению к пучку ультразвука.

При применении протектора уравнение акустического тракта P/P_0 для бесконечной полосы шириной b принимает вид (рис. 5)

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{2} \frac{D_{ll} \cdot D_{lt} \cdot S_a b \cos \alpha}{\left[\lambda_t (r + r'_0) \right]^{3/2} \cos \beta \sin \alpha} \cdot e^{-2 \cdot (\delta \cdot r + \delta_{np} \cdot r_0 + \delta_{nm} \cdot h_{nm} / \cos \beta)}$$

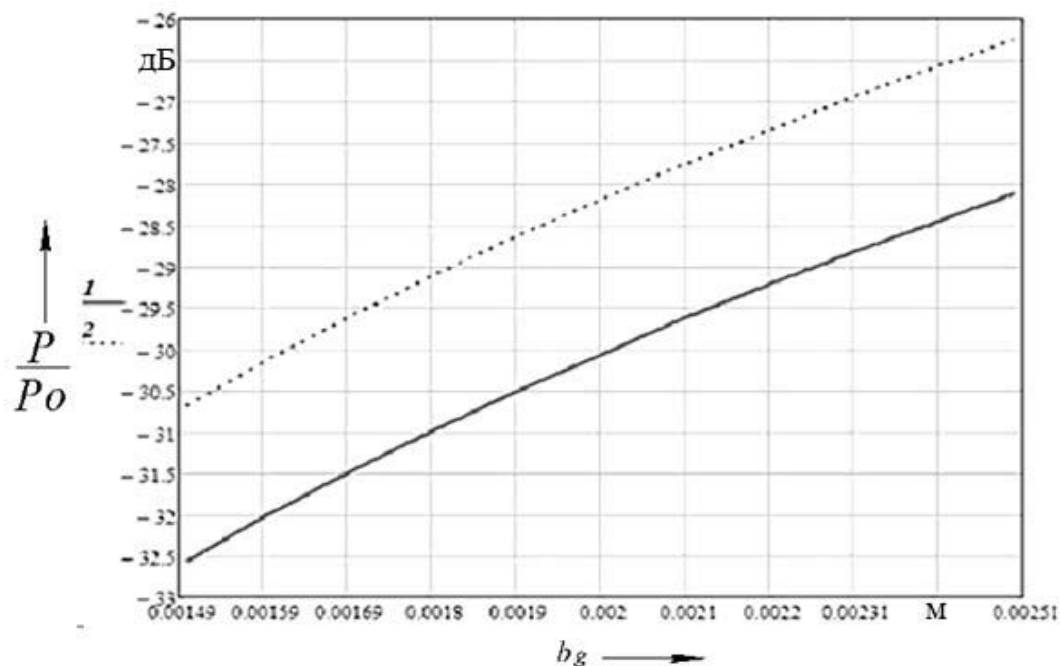


Рис. 5. Зависимость чувствительности от размера дефекта при длине пути ультразвука от точки выхода луча до дефекта $r = 25$ мм: 1 — P/P_0 при контроле бесконечной полосы шириной b_g с протектором; 2 — P/P_0 при контроле бесконечной полосы шириной b_g без протектора

В процессе исследования настройка чувствительности контроля производилась по следующим методикам:

- на стандартном образце СО-2 преобразователем без протектора;
- на стандартном образце СО-2 преобразователем с плоским настроечным протектором;
- на стандартном образце СО-3 преобразователем без протектора с последующей корректировкой чувствительности;
- на стандартном образце СО-3 преобразователем с плоским протектором [1].

Настройка прибора производилась сначала на стандартном образце СО-3, а затем по образцу СО-2.

Значения стрелы и задержки, найденные для каждого преобразователя, используемого как в отдельности, так и совместно с каждым из протекторов, приведены в табл. 2.

Значения угла ввода луча и координат бокового цилиндрического отверстия, найденные для каждого преобразователя, используемого как в отдельности, так и совместно с каждым из протекторов, приведены в табл. 2.

Были найдены реальные значения координат залегания БЦО на углах, полученных при настройке прибора на СО-2. Сравнив экспериментально полученные данные с реальными по каждому из углов, была найдена абсолютная погрешность измерения значений Pa и Da (табл. 3).

Значения абсолютной погрешности на различных преобразователях с различными протекторами представлены гистограммой на рис. 6.

Табл. 2. Поправки, полученные при настройке на образцах СО-3 и СО-2

Преобразователь	Протектор		СО-2				СО-3			Угол, град	Стрела, мм	Задержка, мкс
	Название	Толщина, мм	Амплитуда, %	Усиление, дБ	D_a , мм	P_a , мм	Амплитуда, %	Усиление, дБ	S_a , мм			
2,5 МГц/ 50°	Серый	0,5	53	56,4	44,38	52,28	63	42,2	55	51	9	6,07
	Серый	1	52	60,8	45,73	53,05	50	46		52	9	6,815
	Синий	2	83	68	44,6	51,95	57	48		48	7	8,325
	Бежевый	2	48	56,8	45,16	52,02	62	38		51	9	7,95
	Без протектора		51	20,4	43,5	51,45	77	23,8		50	9	4,5
2,5 МГц/ 70°	Серый	0,5	32	66,6	15,15	41,6	40	49,0		70	11	8,877
	Серый	1	30	66,6	14,6	40	30	44,2		71	11	8,377
	Синий	2	40	61,4	13,95	38,3	40	45		72	12	10,197
	Бежевый	2	35	57,8	14,5	39,49	34	39,8		70	10	8,729
	Без протектора		44	40	14,35	39,42	35	24,8		69	11	6,527
2,5 МГц/ 65°	Серый	0,5	48	67	14,4	30	51	54,6		64	9	6,837
	Серый	1	53	80	14,2	30,3	65	56,0		64	9	7,683
	Синий	2	56	76,2	14,2	30,4	66	63,2		66	11	7,482
	Бежевый	2	55	72,8	14,5	30,35	58	58	65	9	9,015	
	Без протектора		60	52,2	13,56	29,8	37	34	65	10	6,509	
5 МГц/ 70°	Серый	0,5	45	68,2	15,37	42,23	62	68,2	72	11	7,808	
	Серый	1	50	75	14,5	40,08	41	65	70,5	11	7,646	
	Синий	2	32	72,2	14,2	38,9	41	55	70,5	10	9,382	
	Бежевый	2	43	74	15,18	41,7	40	54,4	71	10	8,337	
	Без протектора		38	49	14,33	39,38	36	26,8	72	10	7,270	

Проанализировав значения полученных погрешностей, можно сделать вывод о том, что лучше всего себя показал преобразователь с частотой 2,5 МГц и углом 65°, т. к. данные, полученные при измерении этим преобразователем, имеют наименьшую абсолютную погрешность из представленных на гистограмме.

Табл. 3. Абсолютная погрешность измерения значений Pa и Da на каждом из углов, полученных при настройке по образцу СО-2

Преобразователь	Протектор		Измеренные		Реальные		Абсолютная погрешность	
	Название	Толщина, мм	Da , мм	Pa , мм	Da , мм	Pa , мм	Da , мм	Pa , мм
2,5 МГц/ 50°	Серый	0,5	44,38	52,05	44,0	56,31	0,38	-4,26
	Серый	1	45,73	51,28	44,0	54,33	1,73	-3,05
	Синий	2	44,6	50,95	44,0	39,61	0,6	11,34
	Бежевый	2	45,16	51,02	44,0	54,33	1,16	-3,31
	Без протектора			43,5	50,45	14	52,43	-0,5
2,5 МГц/ 70°	Серый	0,5	15,15	42,6	14	38,33	1,15	4,27
	Серый	1	14,6	41	14	40,65	0,6	0,35
	Синий	2	13,95	39,3	14	43,08	-0,05	-3,78
	Бежевый	2	14,5	40,49	14	38,33	0,5	2,16
	Без протектора			14,35	40,42	14	36,47	0,35
2,5 МГц/ 65°	Серый	0,5	14,4	30	14	30,02	0,4	-0,02
	Серый	1	14,2	30,3	14	30,02	0,2	0,28
	Синий	2	14,2	30,4	14	31,44	0,2	-1,04
	Бежевый	2	14,5	30,35	14	31,44	0,5	-1,09
	Без протектора			13,56	29,8	14	31,44	-0,44
5 МГц/ 70°	Серый	0,5	15,37	42,23	14	43,08	1,37	-0,85
	Серый	1	14,5	40,08	14	39,53	0,5	0,55
	Синий	2	14,2	38,9	14	39,53	0,2	-0,63
	Бежевый	2	15,18	41,7	14	40,65	1,18	1,05
	Без протектора			14,33	39,38	14	43,08	0,33

Заключение. Усовершенствована теоретическая модель акустического тракта для ультразвукового контроля сварных швов труб малого диаметра с использованием съемных печатных протекторов для наклонных преобразователей, учитывающая влияние изменения: эффективного угла ввода ультразвукового луча; расстояния от центра мнимого излучателя-приёмника, соответствующего активной апертуре, до точки выхода луча; затухания в протекторе (изменение длины хода луча по призме); коэффициента прозрачности по энергии на границах призма – протектор – объект.

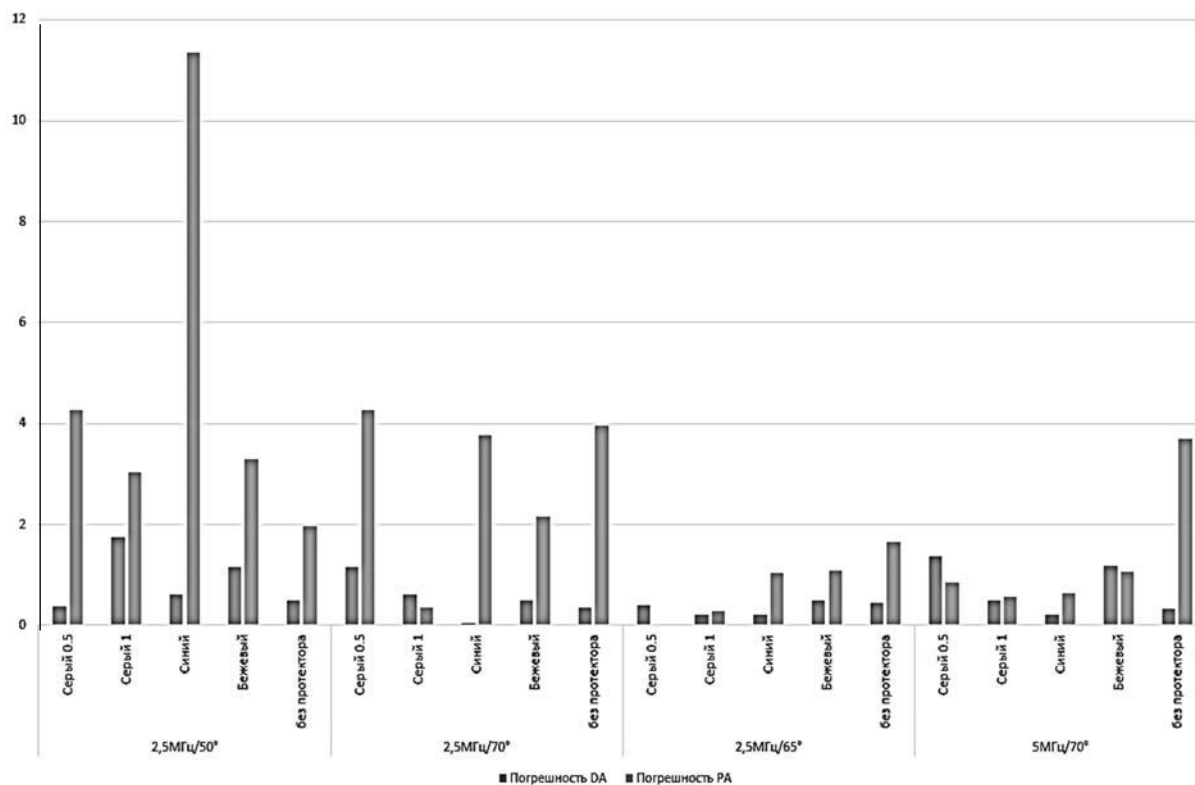


Рис. 6. Гистограмма значений погрешностей измерений для каждого из преобразователей

Получены амплитудные зависимости (АРД-диаграммы) эхосигналов для поперечных волн, трансформированных из продольной волны, для различных искусственных ненаправленных отражателей, которые позволили сформировать методику настройки прибора с использованием протекторов из различных материалов при контроле сварных швов труб, учитывающие влияние всех вышеперечисленных дестабилизирующих факторов и обеспечивающие равномерность чувствительности при сканировании объекта, что в целом способствует повышению достоверности и производительности контроля реальных объектов.

Экспериментально проверено влияние используемых протекторов на величину погрешности измерения местоположения и размеров дефектов по искусственным ненаправленным отражателям для преобразователей с различными углами ввода на частотах 2,5 и 5 МГц. Получены значения абсолютных погрешностей определения координат дефектов.

По результатам исследований предложены некоторые практические рекомендации:

- при использовании протекторов с толщиной контактного слоя более 1 мм наблюдается заметное изменение стрелы и угла ввода;

– в среднем при использовании протекторов задержка увеличивается на 1...3 мкс, что необходимо учитывать для получения точных результатов;

– существенное влияние на амплитуду эхосигналов оказывает шероховатость поверхности контролируемых образцов и контактной поверхности самого протектора, поэтому после печати протектора на 3D-принтере его контактную поверхность необходимо зачистить мелкодисперсной наждачной бумагой;

– для контроля реальных объектов целесообразно применять протекторы с притиркой минимальной толщины для уменьшения задержки, но не менее 0,5 мм, т. к. слишком тонкий протектор имеет малую износостойкость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гордеева, А. С.** Исследование эффективности наклонных пьезопреобразователей со сменными протекторами / А. С. Гордеева, А. В. Сергеев, С. С. Сергеев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 513 с.

2. **Ермолов, Б. В.** Исследование эффективности наклонных пьезопреобразователей со сменными протекторами / Б. В. Ермолов, М. Е. Плотников, А. С. Гордеева // 57 студенч. науч.-техн. конф. Беларус.-Рос. ун-та: материалы конф. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – 216 с.

E-mail: llanyalllanyalll@mail.ru, sss.bru@tut.by.