УДК 620.179.162

ПОСТРОЕНИЕ АРД-ДИАГРАММ ДЛЯ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2025 А. С. Зубарев¹, А. А. Дерябин², В.Н. Козловский³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москвы, Россия ² ООО «АЗ-Инжиниринг», г. Москва, Россия ³ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 27.05.2025

На основе анализ существующих работ доказано, что не существует методики построения диаграмм «амплитуда-расстояние – диаметр» (АРД-диаграммы) для раздельно-совмещенных пьезоэлектрических преобразователей (РС-ПЭП), хотя нормативная документация на производство подобных преобразователей требует комплектовать данные преобразователи АРД- диаграммами. В практической диагностике использование данных диаграмм упрощает настройку оборудования, снижает затраты на изготовление настроечных образцов, тем самым доказывается актуальность данной работы. На основе существующих работ предложена модель, позволяющая рассчитать эхо-сигналы от дисковых отражателей и отражателей в виде плоскости, что позволило построить АРД-диаграмму для РС ПЭП для различных диаметров дисковых отражателей, расположенных на разных глубинах. Разработанная модель расчета позволяет учитывать геометрические и акустические характеристики РС ПЭП, что делает ее универсальной. Проведена экспериментальная проверка полученных расчетных данных АРД-диаграммы подтвердившая правильность подходов моделирования распространения продольной волны, ее отражения от дисковых и плоскостных отражателей применительно к раздельно-совмещенным пьезоэлектрическим преобразователям. Предложены меры для снижения влияния разницы затухания между материалом объекта контроля и материалом изготовления СО-2 (отражателя эхо-сигналов в виде плоскости, применяемого для получения опорного сигнала).

Ключевые слова: продольная волна, затухание, дисковый отражатель, эхо-сигнал, ультразвук, неразрушающий контроль.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-76-82 EDN: OWSKSU

ВВЕДЕНИЕ

В области практического применения ультразвуковых методов неразрушающего контроля регламентировано применение диаграмм «амплитуда-расстояние – диаметр» (АРД –диаграммы). Согласно нормативной документации (ГОСТ Р 55725-2013 «Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические. Общие технические требования») производители пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) обязаны в паспортах на ПЭП предоставлять АРД- диаграмму. В практической диагностике использование данных диаграмм упрощает настройку оборудования, снижает затраты на изготовление настроечных образцов. Данная диаграмма может быть расчетной или полученной экспериментальным путем.

Разработкам АРД-диаграмм посвящены работы российских (Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х, Клюев В.В., Алешин Н.П., Данилов В.Н., Воронков В.А.) и иностранных (Крауткремер Й, Крауткремер Г.) ученых.

В работах [1 – 8] подробно описаны методики построения АРД- диаграмм для прямых и наклонных совмещенных ПЭП. Для указанных ПЭП авторы подробно исследовали аналитические формулы, позволяющие построить зависимость амплитуды принимаемого сигнала от типов отражателей, расстояний от отражателей до ПЭП. Также в указанных работах представлены обобщенные АРД- диаграммы, при помощи которых возможно построение рабочих диаграмм с учетом геометрических размеров источников ультразвука, диаметров дисковых отражателей и затухания ультразвуковых волн в материале. Остается нерешенным вопрос о построении АРД-диаграмм раздельно-совмещенных ПЭП (РС ПЭП), на которые распространяется требование ГОСТ Р 55725-2013.

Решение указанной проблемы требует описание уравнения акустического тракта РС ПЭП и отражения падающей под углом продольной волны на дисковый отражатель.

Зубарев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: info@a3-eng.com

Дерябин Алексей Александрович, кандидат технических наук, исполнительный директор. E-mail: info@a3-eng.com Козловский Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой. E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru В [1 - 8] представлена зависимость амплитуды эхо-сигнала от взаимного расположения плоскости отражателя и источника ультразвука, а также – акустическое поле РС ПЭП, но, используя эти зависимости, авторы не представили уравнение акустического тракта для РС ПЭП.

В [9, 10] решаются вопросы распространения упругих волн в слоистых средах, поэтому решения и научные подходы, представленные в данных работах, могут быть использованы для моделирования распространения и отражения от дискового отражателя продольной волны, что является частью задачи построения АРД – диаграммы РС ПЭП.

В [10] исследовано уравнение акустического тракта дефектоскопа для излучения и приема сигнала при наличии плоской границы, но не рассматривается отражение от дисковых отражателей.

В [11] авторы рассмотрели вопросы, связанные с использованием АРД- диаграмм при эталонировании чувствительности, но не рассмотрели вопросы, связанные с уравнением акустического тракта РС ПЭП.

Исследования, приведенные в работе [13], посвящены рассеиванию волн на неоднородностях, но не рассматриваются вопросы, связанные с уравнением акустического тракта.

В [14] представлен подход к исследованию продольной волны в тонких пластинах с симметричными повреждениями с учетом наклонного падения. В указанной статье представлена модель распространения продольных волн в пластинчатой конструкции, повреждение которой представляет собой симметричное уменьшение толщины. Продольная волна соответствует моде волны Лэмба S0 для низкочастотного диапазона.

В [15] авторы исследуют явления распространения волн в изотропных и анизотропных пластинах, чтобы понять дисперсию направленных волн и подчеркнуть различия, наблюдаемые между структурами.

Результаты работ [14-15] важны для изучения влияния неоднородностей на параметры продольной волны, но для нашей задачи рассмотренные в этих работах подходы не приемлемы, так как в нашем случае продольная волна распространяется полубесконечном теле, а не в ограниченной с двух сторон пластине.

Все выше сказанное указывает на актуальность работ по разработке уравнения акустического тракта РС ПЭП для практических задач неразрушающего ультразвукового контроля.

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Согласно [2, 3], акустическое поле РС ПЭП рассчитывают, построив мнимые излучатели S'_1 и S'_2 для действительных излучателей S_1 и S_2 (расположенных на расстоянии L2 от поверхности объекта контроля и на расстоянии L1 друг от друга) для произвольной точки В (рис.1).

Поле в точке В находят, вычислив расстояния r' и r'' вдоль лучей O' B и O'' B и углы θ' и θ'' между этими лучами и акустическими осями мнимых пластин.



Рис. 1. Акустическое поле РС ПЭП

В результате получаем:

$$P_{\mathcal{B}} \sim \Phi(a' \kappa \sin(\theta')) \Phi(a'' \kappa \sin(\theta')) / r' r'', \qquad (1)$$

где *а* и $a^{//}$ - размеры (радиусы) мнимых пьезопластин в основной плоскости (коэффициенты прозрачности не указаны), Φ – функция диаграммы направленности, $k = \frac{2\pi}{4}$ – волновое число, λ – длина волны.

Как видно из рис. 1 максимум излучения располагается несколько выше пересечения акустических осей, что объясняется влиянием затухания и расхождения лучей. Еще один важный момент показан на рис.1: отражатель расположен не на оси ПЭП.

Для дальнейших расчетов необходимо рассчитать эхо-сигналы от отражателя, расположенного не на оси преобразователя (наклонных к оси).

ЭХО-СИГНАЛЫ ОТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НЕ НА ОСИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Согласно [2,3], общая формула для расчета эхо-сигнала для отражателя в виде диска, расположенного в дальней зоне преобразователя (рис.2) выглядит следующим образом

$$\left|\frac{p'}{p_0}\right| = \frac{s_a s_b}{\lambda^2 r^2} \cos(\varphi - \theta) \left| R(\varphi - \theta) \right| \Phi^2(a\kappa \sin(\theta)) \Phi'[2b\kappa \sin(\varphi - \theta)], \tag{2}$$

где S_a – площадь источника ультразвука (пьезопластины), S_b – площадь отражателя, R – коэффициент отражения продольной волны, P_0 и P^{ℓ} – амплитуды излученного и принятого сигналов, b – радиус отражателя.

Здесь последний множитель **ф**[/] определяет диаграмму направленности отражателя, как вторичный излучатель.



Рис. 2. Схема для расчета эхо-сигнала для наклонного диска



Рис. 3. Схема для расчета эхо-сигнала от наклонной плоскости

Согласно [2], уравнение (2) можно представить в следующим виде:

$$\frac{\delta s_a s_b}{\lambda^2 r^2} \cos(\theta) \cos(\varepsilon) \Phi^2(\theta) \frac{2J_1(2b\kappa\sin(\varepsilon))}{2b\kappa\sin(\varepsilon)} R(\varepsilon) , \qquad (3)$$

где $\varepsilon = \varphi - \theta$ – угол падения на дефект, I_1 – функция Бесселя первого порядка.

Так как для расчета АРД – диаграмм необходимо рассчитать величину опорного эхо-сигнала, то для расчета берем отражение от плоскости: как правило за опорный сигнал берется отражение от плоскости меры CO-2, расположенной на глубине 59 мм.

Расчетная схема для опорного сигнала представлена на рис. 3.

Согласно [2], для плоскости, расположенной под углом ф уравнение выглядит следующим образом:

$$\left|\frac{P'}{P_0}\right| = \frac{S_a}{2\lambda r'} \cos(\theta) \Phi^2(\varphi), \tag{4}$$

где r' – кратчайшее расстояние от преобразователя до плоскости, S – площадь пьезопластины.

Для дальнейших расчетов необходимо рассчитать коэффициент отражения продольной волны от отражателя.

Согласно [9-10], коэффициент отражения можно рассчитать следующим образом:

$$R(\varepsilon) = \frac{\cos(\varepsilon)tg^{2}(2\gamma) - \frac{C_{12}}{C_{21}}/\frac{C_{12}}{C_{21}}\cos(\gamma)}{\cos(\varepsilon)tg^{2}(2\gamma) + \frac{C_{12}}{C_{21}}\cos(\gamma)},$$
(5)

где C_{l2} – скорость продольной волны в металле, C_{t2} – скорость поперечной волны в металле, $\gamma = \arcsin(\frac{c_{t2}}{c_{l2}}\sin(\varepsilon))$ – угол распространения трансформированной поперечной волны.

Для уравнения (1) было отдельно указано, в нем отсутствует коэффициент прозрачности границ для продольной волны. Для точного построения АРД- диаграмм данный коэффициент необходимо учитывать.

Согласно [1], коэффициент прозрачности границ по амплитуде для продольной волны можно рассчитать следующим образом:

$$D_{ll} = \frac{2}{\mathcal{A}} Z_2 \frac{z_{l1} \cos(\epsilon)}{z_{l2} \cos(2\delta_{t2})},$$
(6)

где
$$\Delta = Z_1 + Z_2 + W_1 + W_2, Z_1 = \frac{z_{l1}}{\cos(\beta)}\cos^2(2\beta), Z_2 = \frac{z_{l2}}{\cos(\alpha_{l2})}\cos^2(2\alpha_{t2}), W_1 = \frac{z_{t1}}{\cos(\beta)}\sin^2(2\beta), W_2 = \frac{z_{t2}}{\cos(\alpha_{t2})}\sin^2(2\alpha_{t2}), Z_{l1} = \rho_1 C_{l1}, Z_{l2} = \rho_2 C_{l2}, Z_{t1} = \rho_1 C_{t1}, Z_{t2} = \rho_2 C_{t2}, \beta$$
 – угол наклона пье-

зопластины, α_{l2} – угол распространения продольной волны, α_{t2} – угол распространения поперечной волны, ρ_1 – плотность призмы, c_2 – плотность металла, C_{l1} – скорость продольной волны в призме, C_{t2} – скорость поперечной волны в призме.

Формулы (1-6) позволяют произвести расчет АРД- диаграмм для заданных РС ПЭП.

РАСЧЕТ АРД-ДИАГРАММ ДЛЯ РС ПЭП

Расчетная схема РС ПЭП представлена на рис. 4.

Используя данные о геометрических характеристиках, акустических и механических свойств серийных РС ПЭП, был произведен расчет для РС ПЭП 112 с частотой 5 МГц, пьезопластиной с диаметром 10 мм, рассеченная на две равные половины. В качестве опорного сигнала был принят эхосигнал от плоскости меры СО-2, расположенной на глубине 59 мм.



Рис. 4. Расчетная схема РС ПЭП:

1– пьезопластина источника, 2 – призма источника, 3 – пьезопластина приемника, 4 – призма приемника, 5 – точка центра масс источника, δ – зазор между призмами (необходим для размещения акустического изолятора и электромагнитного экрана), Ц – центр масс, L_μ – высота источника, L_Π – высота приемника

Разница амплитуд А между эхо-сигналами от дискового отражателя A_{d} и плоскости меры CO-2 (опорного) A_{on} рассчитывалась по формуле: $A = A_{d} - A_{on}$, используя формулы (1-6).

Результаты расчета представлены на рис. 5.

Для проверки результатов расчетов была проведена экспериментальная проверка.

ЭКСПЕРИМЕТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Целью проведения эксперимента являлась проверка правильности расчета АРД-диаграммы. Задачей эксперимента являлась: измерение разницы амплитуды сигнала от дискового отражателя и опорного эхо-сигнала от плоскости меры СО-2, расположенной на глубине 59 мм.

Для измерения амплитуды эхо-сигналов был изготовлен образец (рис. 6) из Ст-3. Схема эксперимента представлена на рис 7.

В качестве оборудования применялся дефектоскоп UCD -50, мера CO-2 и ПЭП-112-5-10/2. Исследования проводились на частоте 5 МГц.



Рис. 5. АРД – диаграмма для РС ПЭП 112-5-10/2, где h – глубина нахождения дискового отражателя диаметром b

Rz40



Рис. 6. Ступенчатый образец с дисковыми отражателями

Измерения проводились для дискового отражателя d=1.6 мм в четырех позициях, согласно рис. 7. Позиция 1- глубина залегания отражателя 20 мм, позиция 2- 30 мм, позиция 3- 40 мм, позиция 4 – 50 мм.

Измерение опорного сигнала проводилась при помощи меры CO-2 согласно рис. 8.

В таблице 1 представлены результаты измерения изменения разницы амплитуд между эхо-сигналом дискового отражателя b=1.6 мм и опорным сигналом.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведения экспериментов выяснилось, что максимальная относительная погрешность составила не более 8 %, что подтверждает правильность составленной расчетной модели расчета эхо-сигналов от от-

ражателей в виде диска и плоскости для РС ПЭП. Однако данная модель не учитывает разницу затухания продольных волн между контрольным образцом с дисковыми отражателями и мерой CO-2. В нашем случае затухание в образце с отражателями и CO-2 было одинаковым. В случае, если материал изготовления объекта контроля и меры CO-2 имеют различия, то необходим пересчет значений АРД- диаграммы. Методика пересчета подробно представлена в работах [1-5] и рекомендуется для применения. Другим подходом, позволяющим исключить влияние разницы затухания между объектом контроля и CO-2, является изготовление CO-2 или специального плоскостного отражателя эхо-сигналов (для получения опорного сигнала) из материала изготовления объекта контроля

выводы

1. В результате проведенного моделирования процесса распространения продольной волны и ее отражения от дискового и плоскостного отражателей получены формулы для расчета эхо-сигналов от указанных отражателей для РС ПЭП.

2. Теоретически рассчитана АРД – диаграмма для РС ПЭП 112-5-10/5 для материала объекта контроля Ст 20. Экспериментальная проверка для данного типа ПЭП показала, что максимальная погрешность измерения разницы эхо-сигнала от отражателя диаметром 1.6 мм, расположенного на глубинах 20, 30, 40 и 50 мм, и опорным сигналом от плоскости, расположенной на глубине 59 мм, составила не более 8 %. Таким образом, предлагаемый подход к построению АРД- диаграмм для РС ПЭП показал свою актуальность и применимость в практической диагностике.



Рис. 7. Схема эксперимента

Рис. 8. Схема измерения опорного сигнала

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения
оазницы амплитуд эхо-сигналов между дисковым отражателем и опорным сигналом

Диаметр	Глубина залегания	Разница амплитуд	Разница амплитуд	Относительная
отражателя,	отражателя, мм	А расчетная, дб	A	погрешность, %
MM			экспериментальная,	
			дб	
1.6	20	-2.3	-2.5	8
1.6	30	-10.1	9.5	6
1.6	40	-16.5	17	3
1.6	50	21.8	20.5	6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Алёшин, Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие / Н.П. Алёшин. М.: Машиностроение, 2006. 368 с.
- 2. *Ермолов, И.Н.* Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. Краткий справочник / И.Н. Ермолов, А.Х. Вопилкин, В.Г. Бадалян. – М: ООО НПЦ НК «Эхо+». 2004. – 108 с.
- 3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля [под. ред. И.Н. Ермолова]. М.: Машиностроение, 1986. – 228 с.
- 4. *Ермолов, И.Н.* Акустический метод контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов. М: Высшая школа. 1991. 288 с.
- 5. *Ермолов, И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. М: Машиностроение. 1981. 235 с.
- 6. Rose J.L. Ultrasonic guided waves in solid media Cambridge University Press, 2014. 512 p.
- 7. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник [под ред. В.В. Клюева]. М: Машиностроение. 1995. 288 с.
- 8. *Крауткремер, Й*. Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. М: Металлургия 1989. 752 с.
- 9. *Бреховских, Л.М.* Введение в механику сплошных сред / Л.М. Бреховских, В.В. Гончаров. М.: Наука, 1982. 335 с.
- 10. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1973. 344 с.
- 11. *Данилов, В.Н.* Исследование расчетной модели акустического тракта дефектоскопа для отражателя в виде плоскости / В.Н. Данилов // Дефектоскопия. 1997. № 1. С 12- 25.
- 12. *Воронков, В.А.* К вопросу об эталонировании чувствительности ультразвукового контроля с использованием АРД-диаграмм / В.А. Воронков, В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 2001. - №1. С 56 -61.
- 13. *Hossein Khodavirdi, Zhun-Yong Ong, Ankit Srivastava*. The Atomistic Green's Function method for acoustic and elastic wave-scattering problems // International Journal of Mechanical Sciences 275 (2024) 109263.
- 14. *Kayc W. Lopes , Camila G. Gonsalez-Bueno, Daniel J. Inman , Douglas D. Bueno.* Longitudinal wave scattering in thin plates with symmetric damage considering oblique incidence // Ultrasonics 136 (2024) 107161.
- 15. A. De Luca, D. Perfetto, G. Lamanna, A. Aversano, F. Caputo, Numerical investigation on guided waves dispersion and scattering phenomena in Stiffened Panels, Materials 15 (1) (2022).

CONSTRUCTION OF ARD DIAGRAMS FOR SEPARATELY COMBINED PIEZOELECTRIC CONVERTERS

© 2025 A.S. Zubarev¹, A.A. Deryabin², V.N. Kozlovsky³

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia ² JSC «A3 Engineering», Moscow, Russia ³ Samara State Technical University, Samara, Russia

Based on the analysis of existing works, it is proved that there is no methodology for constructing "amplitude-distance – diameter" diagrams (ARD diagrams) for separately combined piezoelectric converters (RS-PEP), although the regulatory documentation for the production of such converters requires completing these converters with ARD diagrams. In practical diagnostics, the use of these diagrams simplifies the configuration of equipment, reduces the cost of manufacturing tuning samples, thereby proving the relevance of this work. Based on existing work, a model has been proposed that allows us to calculate echo signals from disk reflectors and reflectors in the form of a plane, which made it possible to construct an ARD diagram for PC PEP for different diameters of disk reflectors located at different depths. The developed calculation model allows taking into account the geometric and acoustic characteristics of the PC PEP, which makes it universal. An experimental verification of the obtained calculated data of the ARD diagram was carried out, which confirmed the correctness of the approaches to modeling the propagation of a longitudinal wave, its reflection from disk and planar reflectors in relation to separately combined piezoelectric transducers. Measures are proposed to reduce the effect of the attenuation difference between the material of the object of control and the material of manufacture of CO-2 (an echo reflector in the form of a plane used to obtain a reference signal).

Key words: longitudinal wave, attenuation, disk reflector, echo signal, ultrasound, non-destructive testing. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-76-82

EDN: OWSKSU

REFERENCES

- 1. *Alyoshin, N.P.* Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnyh soedinenij: uchebnoe posobie / N.P. Alyoshin. M.: Mashinostroenie, 2006. -368 s.
- 2. *Ermolov, I.N.* Raschety v ul'trazvukovoj defektoskopii. Kratkij spravochnik / I.N. Ermolov, A.H. Vopilkin, V.G. Badalyan. M: OOO NPC NK «Ekho+». 2004. 108 s.
- 3. Ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya [pod. red. I.N. Ermolova]. M.: Mashinostroenie, 1986. 228 s.
- Ermolov, I.N. Akusticheskij metod kontrolya / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov. M: Vysshaya shkola. 1991. – 288 s.
- 5. Ermolov, I.N. Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya / I.N. Ermolov. M: Mashinostroenie. 1981. 235 s.
- 6. *Rose J.L.* Ultrasonic guided waves in solid media Cambridge University Press, 2014. 512 p.
- 7. Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika. Spravochnik. [pod red. V.V. Klyueva]. M: Mashinostroenie. 1995. 288 s.
- 8. *Krautkremer, J.* Ul'trazvukovoj kontrol' materialov / J. Krautkremer, G. Krautkremer. M: Metallurgiya 1989. 752 s.
- 9. *Brekhovskih, L.M.* Vvedenie v mekhaniku sploshnyh sred / L.M. Brekhovskih, V.V. Goncharov. M.: Nauka, 1982. 335 s.
- 10. Brekhovskih, L.M. Volny v sloistyh sredah / L.M. Brekhovskih. M.: Nauka, 1973. 344 s
- 11. *Danilov, V.N.* Issledovanie raschetnoj modeli akusticheskogo trakta defektoskopa dlya otrazhatelya v vide ploskosti / V.N. Danilov // Defektoskopiya. 1997. № 1. S 12- 25.
- 12. *Voronkov, V.A.* K voprosu ob etalonirovanii chuvstvitel'nosti ul'trazvukovogo kontrolya s ispol'zovaniem ARDdiagramm / V.A. Voronkov, V.N. Danilov // Defektoskopiya. – 2001. - №1. S 56 -61.
- 13. *Hossein Khodavirdi, Zhun-Yong Ong, Ankit Srivastava*. The Atomistic Green's Function method for acoustic and elastic wave-scattering problems // International Journal of Mechanical Sciences 275 (2024) 109263.
- 14. *Kayc W. Lopes , Camila G. Gonsalez-Bueno, Daniel J. Inman , Douglas D. Bueno.* Longitudinal wave scattering in thin plates with symmetric damage considering oblique incidence // Ultrasonics 136 (2024) 107161.
- 15. A. De Luca, D. Perfetto, G. Lamanna, A. Aversano, F. Caputo, Numerical investigation on guided waves dispersion and scattering phenomena in Stiffened Panels, Materials 15 (1) (2022).

Alexey Zubarev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: info@a3-eng.com Alexey Deryabin, Candidate of Technical Sciences, Executive Director. E-mail: info@a3-eng.com Vladimir Kozlovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. E-mail: Kozlovskiy-76@mail.ru