

Моделирование стержневого пьезокерамического преобразователя для оптимизации его геометрических параметров

Х. К. Альсаид, П. П. Пивнев✉, В. И. Калюта

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉ pivnevpp@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается составной пьезокерамический преобразователь с тыльной и излучающей накладками (преобразователь типа Tonpilz). Проведено конечно-элементное моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics для оптимизации геометрических параметров преобразователя. Экспериментальные исследования выполнены на уникальной научной установке «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс». Установлено, что после полимеризации клеящего состава полоса пропускания преобразователя расширилась с 1.29 до 8.7 % и сместилась в низкочастотный диапазон. При нагрузке излучающей поверхности слоем полиуретана полоса пропускания значительно расширилась – до 20.78 %. Результаты исследования показывают критическое влияние технологических факторов на электроакустические характеристики составных преобразователей.

Ключевые слова: преобразователь типа Tonpilz, стержневой пьезокерамический преобразователь 1–3, конечно-элементное моделирование, электроакустические характеристики, гидролокация

Для цитирования: Альсаид Х. К., Пивнев П. П., Калюта В. И. Моделирование стержневого пьезокерамического преобразователя для оптимизации его геометрических параметров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 38–44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-38-44.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Modeling of a Rod Piezoelectric Transducer to Optimize Its Geometric Parameters

H. K. Alsaeed, P. P. Pivnev✉, V. I. Kalyuta

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ pivnevpp@sfedu.ru

Abstract. Rod piezoceramic transducers under load on the water environment have a comparatively narrow bandwidth and low efficiency due to poor matching. One of the possible ways to improve the matching of the transducer with the environment is based on the use of pads. In this paper, a composite piezoceramic transducer with a back and radiating pad (Tonpilz type transducer) is considered. Finite element modeling was performed using COMSOL Multiphysics software to optimize the geometric parameters of the transducer. Experimental studies were carried out using a unique scientific installation «Simulation-natural hydroacoustic complex». It was established that after polymerization of the adhesive composition, the bandwidth of the transducer expanded from 1.29 to 8.7 % and shifted to the low-frequency range. When loading the radiating surface with a polyurethane layer, the bandwidth significantly expanded to 20.78 %. The research results show the critical influence of technological factors on the electroacoustic characteristics of composite transducers.

Keywords: tonpilz type transducer, rod piezoelectric transducer 1–3, finite element modeling, electro acoustic characteristics, sonar

For citation: Alsaeed H. K., Pivnev P. P., Kalyuta V. I. Modeling of a Rod Piezoelectric Transducer to Optimize Its Geometric Parameters // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 10. P. 38–44. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-38-44.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Тип преобразователей Tonpilz – это один из наиболее распространенных типов подводных акустических преобразователей средней частоты (1...60 кГц), широко применяющихся в современных гидролокационных системах благодаря относительно простой конструкции, высокой эффективности и значительному электромеханическому коэффициенту связи [1], [2].

Конструктивно преобразователь состоит из составного пьезоэлемента, излучающей накладки на переднем конце и тыльной накладки на противоположном конце. Поскольку преобразователь Tonpilz – узкополосный преобразователь резонансного типа, его рабочая частота определяется основным продольным модовым резонансом, который обратно пропорционален осевому размеру преобразователя [3]. Следовательно, для достижения более низкой одномодовой рабочей частоты требуется преобразователь большего размера с соответствующим увеличением массы.

Современные требования к гидроакустическим системам предполагают расширение полосы пропускания преобразователей при сохранении высокой эффективности преобразования энергии [4], [5]. При изготовлении таких преобразователей критически важен контроль электроакустических характеристик на различных этапах технологического процесса сборки [6].

Цель исследований, отраженных в данной статье, заключается в изучении влияния технологических факторов на характеристики составного стержневого пьезокерамического преобразователя типа Tonpilz и разработке рекомендаций по оптимизации его параметров.

Моделирование преобразователя. Оно требует различных шагов, начиная с выбора геометрии, конечно-элементного анализа, определения выбора домена, границ и системы координат для поляризации, затем – назначения граничных условий и свойств материала и, наконец, вычисления и построения графиков по результатам. При проектировании преобразователей приложение COMSOL Multiphysics позволяет значительно уменьшить количество конструктивных ошибок [5]. Метод конечных элементов использовался для решения разнообразных инженерных и научных задач. В нем численные аппроксимации выводятся из частных дифференциальных уравнений для проблемных областей при общих граничных условиях. Основной принцип подхода включает дискретизацию проблемной области на конечное число компонентов с последующей агрегацией дискретных реше-

ний для этих элементов, чтобы получить решение всей задачи [6]–[12]. В этом исследовании применяется пьезокерамический состав ЦТБС-3, свойства которого приведены в табл. 1.

Конечно-элементный анализ был проведен для преобразователя, показанного на рис. 1.

Табл. 1. Параметры материала ЦТБС-3
Tab. 1. Parameters of the material CTBS-3

Параметры	Значение	Группа свойств
Плотность, кг/м ³	7250	Основной
Матрица эластичности, Па	{1.51e+011, 7.9e+010, 1.51e+011, 8.0e+010, 8.0e+010, 1.36e+011, 0, 0, 0, 0, 2.9e+010, 0, 0, 0, 2.9e+010, 0, 0, 0, 3.6e+010}	Стресс-зарядовая форма
Матрица связи, с/м ²	{0, 0, -7.9, 0, 0, -7.9, 0, 0, 17.7, 0, 15.4, 0, 15.4, 0, 0, 0, 0, 0}	Стресс-зарядовая форма
Относительная диэлектрическая проницаемость	{1428.85, 1428.85, 1132.8}	Стресс-зарядовая форма

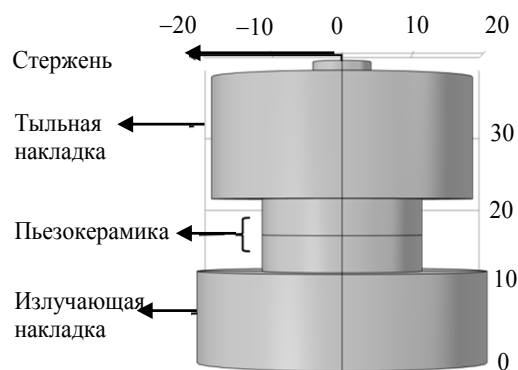


Рис. 1. Составной стержневой («грибовидный») преобразователь

Fig. 1. Composite rod («mushroom») transducer

В качестве среды излучения был построен водный домен достаточно большого размера, чтобы обеспечить расстояние дальнего поля. Параметры конечного элемента компонентов модели показаны в табл. 2.

Табл. 2. Параметры модели конечных элементов
Tab. 2. Parameters of the finite element model

Геометрические детали	Материал	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа
Тыльная накладка	Сталь СТЗ	0.3	7850	210
Исходящая накладка	Сплав АМГ-6	0.32	2640	68.9
Радиационная среда	Вода	–	1000	–

Табл. 3. Параметры геометрии
Tab. 3. Geometry parameters

Компонент	Параметр	Значение	Геометрия рабочей плоскости	Материал	Скорость звука, м/с
Тыльная накладка	Ширина, мм	15	Прямоугольник	Сталь СТ-3	5930
	Высота, мм	16			
Керамический штабель	Ширина, мм	6	Прямоугольник	ЦТБС-3	3470
	Высота, мм	9.5			
Излучающая накладка	(Ширина X_w , высота Y_w), координаты вершин, мм	(3,12); (20,12); (20,0); (3,0)	Трапецевидный	Алюминий АМГ-6	6340 ± 30
Вода	Радиус ($R_{\text{water}} + R_{\text{pml}}$), мм	(40 + 10)	Круг	Вода	1500

В области акустического давления и частоты жесткая граница звука определяется на поверхности воды при расчете поля. Температура поддерживается на уровне 293.15 К на внешней границе воды, а начальное значение давления равно 0 Па. Начальными граничными условиями служат смещение и скорость, и оба они были на уровне нуля. Начальное напряжение электростатики также равно нулю.

Геометрия преобразователя. В моделировании преобразователя наиболее важен выбор его геометрии для различных частей, представленных в табл. 3 с материалами, геометрическими параметрами и формами. Кроме того, для изучения влияния активной площади поперечного сечения излучающих колец и изменения количества слоев пьезокерамического пакета. Геометрия излучающей накладки определяется координатами вершин ее осесимметричного сечения (параметры: ширина X_w и высота Y_w), представляющего собой трапецевидный профиль.

На рис. 2 представлено симметрическое сечение геометрии модели преобразователя, использованное в конечно-элементном анализе. Модель включает все основные компоненты: тыльную накладку, пьезокерамический пакет, излучающую накладку и окружающую водную среду.

В данном преобразователе область DI можно наблюдать в диапазоне с 23 по 48 кГц, резонанс 27 кГц и антирезонанс смещается в сторону более высоких частот, как показано на рис. 3 (а, б). Частотная характеристика индекса направленности рассчитана на осевом расстоянии 10 м от излучающей накладки, график удельного акустического сопротивления показывает абсолютное значение, а также реальную и мнимую составляющие на границе раздела между излучающей накладкой и водой. Пики TRP также смещаются в сторону более высоких частот, и значение TRP увеличивается, как показано на рис. 3, в, где представлена

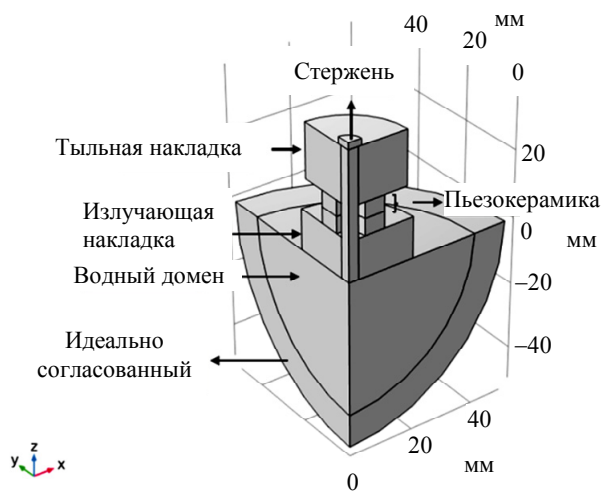


Рис. 2. Симметрическое сечение геометрии модели
Fig. 2. Symmetrical section of the model geometry

общая излучаемая мощность преобразователя в диапазоне рабочих частот от 1 до 60 кГц. Пик TVR на рис. 3, г показывает обратную корреляцию, в то время как TRP показывает положительную корреляцию, поскольку он увеличивается в зависимости от толщины излучающей накладки. Отклик передаваемого напряжения получен на осевом расстоянии 1 м перед излучающей накладкой и рассчитан относительно 1 мкПа/В.

Макетирование преобразователя. В рамках исследований был изготовлен составной стержневой («грибовидный») преобразователь, внешний вид которого показан на рис. 4.

Для проверки моделирования были проведены измерения электроакустических параметров на каждом этапе разработки преобразователя. Измерения проводились на уникальной научной установке «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс», расположенной на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники ЮФУ. Структурная схема измерительного стенда представлена на рис. 5.

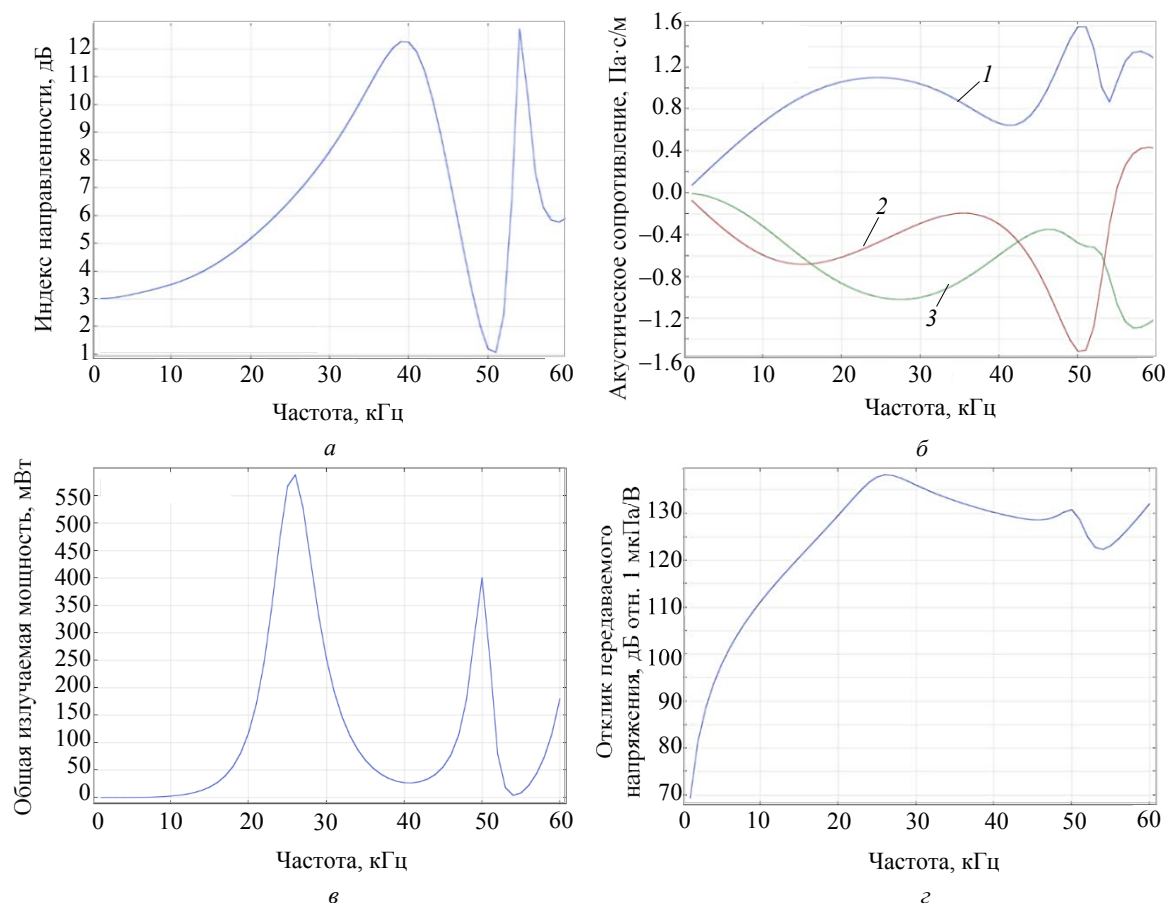


Рис. 3. Характеристики преобразователя: *а* – индекс направленности (DI); *б* – абсолютное значение удельное акустическое сопротивление (SAI) (*1* – абсолютное значение, *2* – реальная часть, *3* – мнимая часть); *в* – общая излучаемая мощность (TRP); *г* – отклик передаваемого напряжения (TVR)
 Fig. 3. Transducer characteristics: *a* – directivity index (DI); *б* – specific acoustic impedance (SAI) (*1* – absolute value, *2* – real part, *3* – imaginary part); *в* – total radiated power (TRP); *г* – transmitted voltage response (TVR)



Рис. 4. Макет составного стержневого преобразователя
 Fig. 4. Model of a composite rod converter

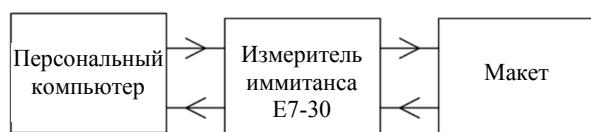


Рис. 5. Структурная схема измерительной установки
 Fig. 5. Structural diagram of the measuring setup

Для выбранного экспериментального образца были проведены 3 основных измерения на различных этапах его сборки: свежесклеенный макет (до полимеризации клеевой массы), склеенный макет (через 24 ч после склеивания), с имитацией нагрузки излучающей накладки.

На рис. 6 приведены частотные зависимости активной составляющей полного сопротивления собранного макета до полимеризации клея. Из рисунка видно, что полоса пропускания преобразователя $\Delta F = 0.4$ кГц, что составляет 1.29 % от центральной частоты (31.0 кГц) и лежит в диапазоне от 30.8 до 31.2 кГц. Значение активной составляющей полного сопротивления преобразователя в полосе частот составляет от 370 до 740 Ом.

На рис. 7 представлена измеренная частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления изготовленного макета после полимеризации клеевой массы (через 24 ч после склейки).

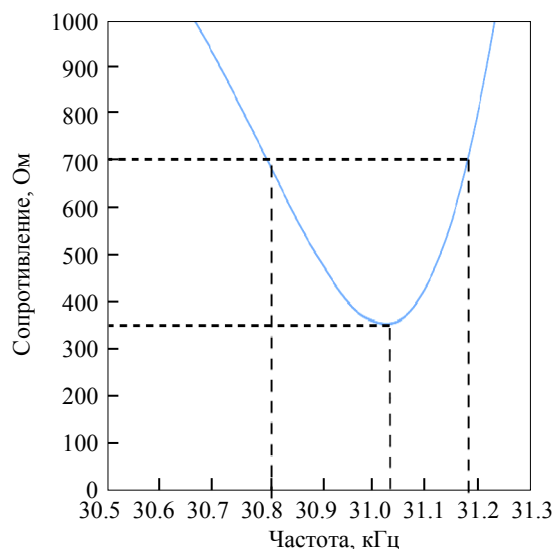


Рис. 6. Частотная зависимость активной составляющей сопротивления макета до полимеризации клея
Fig. 6. Frequency dependence of the active component of the resistance of the model before polymerization of the glue

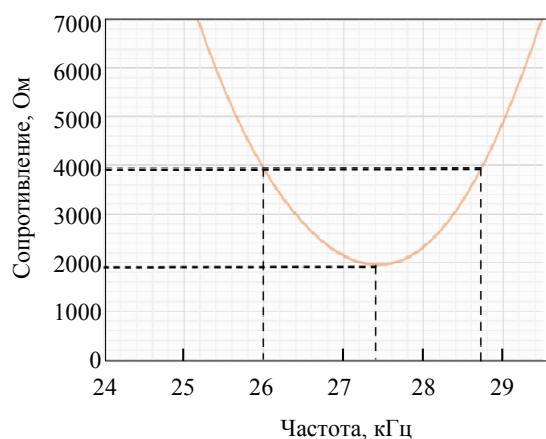


Рис. 7. Частотная зависимость активной составляющей сопротивления склеенного макета после полимеризации клеевой массы (через 24 ч после склейки)
Fig. 7. Frequency dependence of the active component of the resistance of the glued model after polymerization of the adhesive mass (24 hours after gluing)

Из рис. 7 видно, что полоса пропускания преобразователя $\Delta F = 2.7$ кГц, что составляет 8.7 % и лежит в диапазоне от 26 до 28.7 кГц. Значение активной составляющей полного сопротивления макета в полосе частот составило от 1955 до 3955 Ом.

Поскольку составные преобразователи конструктивно в антенне нагружаются на заливочный (герметизирующий) компаунд излучающей накладкой, следующим этапом исследования стало добавление на излучающую накладку макета преобразователя герметизирующего компаунда (полиуретановый двухкомпонентный компаунд СПБ-ХП-80).

На рис. 8 представлена частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления макета с нанесенным на излучающую накладку слоем полиуретанового компаунда СПБ-ХП-80.

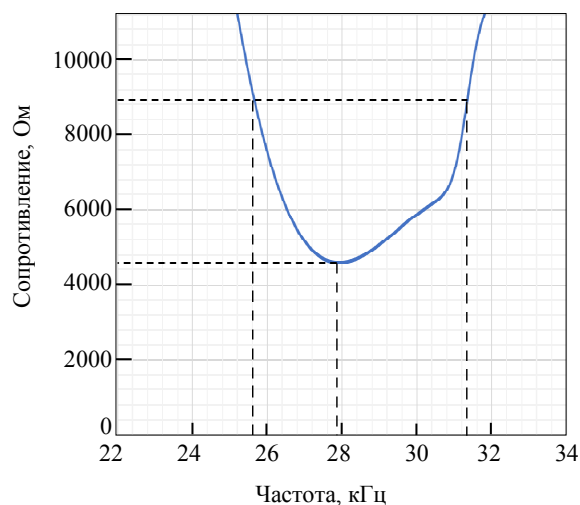


Рис. 8. Частотная зависимость активной составляющей сопротивления макета с имитацией нагрузки на воду
Fig. 8. Frequency dependence of the active component of the resistance of the model with imitation of the load on water

Из рис. 8 видно, что полоса пропускания макета составила $\Delta F = 5.8$ кГц, что составляет 20.78 % от центральной частоты (27.9 кГц) и лежит в диапазоне от 25.6 до 31.4 кГц. Значение активной составляющей полного сопротивления макета в полосе частот составляет от 4604.8 до 9346 Ом.

Обсуждение результатов. Проведенные исследования выявили критическое влияние технологических факторов на электроакустические характеристики составных пьезокерамических преобразователей. Установлено, что процесс полимеризации клеящего состава приводит к существенному изменению резонансных свойств системы. Расширение полосы пропускания с 1.29 до 8.7 % после полимеризации клея обусловлено изменением механических свойств клеевого соединения, что влияет на демпфирование колебательной системы. Смещение резонансной частоты в низкочастотную область связано с увеличением эффективной массы системы за счет затвердевшего клея. Нанесение герметизирующего компаунда на излучающую накладку приводит к дальнейшему расширению полосы пропускания до 20.78 %, что может быть объяснено дополнительным демпфированием и изменением граничных условий на излучающей поверхности.

Закключение. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить закономерности влияния технологических факторов на характеристики составных стержневых пьезокерамических преобразователей типа Tonpilz:

1. После полимеризации клеящего состава полоса пропускания расширяется с 1.29 до 8.7 % и смещается в низкочастотный диапазон с 30.8... 31.2 до 26...28.7 кГц.

2. Нагрузка излучающей поверхности слоем полиуретанового компаунда приводит к значительному расширению полосы пропускания до 20.78 % при соответствующем увеличении активной составляющей полного сопротивления.

3. Конечно-элементное моделирование в COMSOL Multiphysics показало удовлетворитель-

ное согласование с экспериментальными данными по основным характеристикам преобразователя.

4. При конструировании гидроакустических антенн необходимо учитывать влияние клеящего состава и герметизирующих материалов на электроакустические характеристики преобразователей.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов изготовления составных пьезокерамических преобразователей и прогнозирования их характеристик на этапе проектирования.

Список литературы

1. Muhsen H. K., Pivnev P. P. Hydroacoustic complex for studying the condition of underwater engineering communications of the cable network // Intern. Ural Conf. on Electr. Power Engin. (UralCon). Magnitogorsk: IEEE Xplore, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/UralCon49858.2024.10224563.

2. Optimization and characterization of a wideband multimode Tonpilz transducer for underwater acoustical arrays / M. S. Afzal, Y. Lim, S. Lee, H. Yoon, Y. Roh // Sensors and Actuators A: Phys. 2020. Vol. 307. P. 112001. doi: 10.1016/j.sna.2020.112001.

3. Experimental investigation of a Tonpilz transducer operating in the frequency band of 20–80 kHz / Q. Liu, K. Zhou, F. Wang, Y. Zhang, X. Li // The J. of the Acoustical Soc. of America. 2024. Vol. 155, no. 6. P. 3600–3605. doi: 10.1121/10.0026222.

4. Шляхин Д. А., Саввинова Е. В. Связанная нестационарная осесимметричная задача термоэлектродупругости для круглой пьезокерамической шарнирно закрепленной пластины // Вестн. СамГТУ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 27, № 1. С. 159–178. doi: 10.14498/vsgtu1959.

5. Ferroelectric ceramics and composites for piezoelectric transducer applications / A. Safari, E. K. Akdoğan, J. D. Leber // Jap. J. of Appl. Phys. 2022. Vol. 61, no. SN. P. SN0801. doi: 10.35848/1347-4065/ac8bdc.

6. Thermal management in piezoelectric transducers via anisotropic heat conduction / F. Li, J. Chen, X. Wang, Y. Liu // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. Vol. 68, no. 10. P. 3121–3130. doi: 10.1109/TUFFC.2021.3097321.

7. Сутырина Л. В., Карасева Т. В., Пименов В. Н. Моделирование пьезокерамического элемента с волноводом с помощью ANSYS // Приволжский науч. вестн. 2016. № 12–2 (64). С. 85–92. doi: 10.17117/pv.2016.12.02.024.

8. Ермолаев Э. В., Махов В. И. Анализ работы и расчет пьезокерамического стержня с накладкой при использовании конечно-элементного моделирования // Тр. Крыловского ГНЦ. 2019. Спецвып. 2. С. 263–268. doi: 10.24937/2542-2324-2019-2-5-1-263-268.

9. Определение модуля упругости материалов импедансным методом / А. В. Азин, С. В. Пономарев, С. В. Рикконен, А. В. Васильев // Космические аппараты и технологии. 2025. № 1. С. 5–13. doi: 10.26732/j.st.2025.1.01.

10. Давыдов Д. А., Нерук В. Ю., Пивнев П. П. Исследование импеданса широкополосного акустического пьезопреобразователя, составленного из разночастотных излучателей (краткое сообщение) // Науч. приборостроение. 2023. Т. 33, № 4. С. 56–59. doi: 10.18358/np-33-4-i7884.

11. Паньков А. А. Влияние механической нагрузки на результирующие пьезомодули композита // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2022. № 3. С. 156–165. doi: 10.15593/perm.mech/2022.3.07.

12. Мухсин Х. К. М., Пивнев П. П., Калюта В. И. Обзор широкополосных гидроакустических преобразователей на основе пьезокомпозитов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 28–43. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-28-43.

Информация об авторах

Альсайд Хайдер Карим Мехсин – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологической академии, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия. E-mail: mukhsin@sfsedu.ru

Пивнев Петр Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологической академии, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия. E-mail: pivnevpp@sfsedu.ru
https://orcid.org/0000-0003-4900-112X

Калюта Владимир Игоревич – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, научный сотрудник. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологической академии, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: kalyuta@sfnedu.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5485-614X>

References

1. Muhsen H. K., Pivnev P. P. Hydroacoustic Complex for Studying the Condition of Underwater Engineering Communications of the Cable Network // Int. Ural Conf. on Electr. Power Engin. (UralCon). Magnitogorsk: IEEE Xplore, 2024. P. 1–6. doi: 10.1109/UralCon49858.2024.10224563.
2. Optimization and characterization of a wideband multimode Tonpilz transducer for underwater acoustical arrays / M. S. Afzal, Y. Lim, S. Lee, H. Yoon, Y. Roh // Sensors and Actuators A: Phys. 2020. Vol. 307. P. 112001. doi: 10.1016/j.sna.2020.112001.
3. Experimental investigation of a Tonpilz transducer operating in the frequency band of 20–80 kHz / Q. Liu, K. Zhou, F. Wang, Y. Zhang, X. Li // The J. of the Acoustical Soc. of America. 2024. Vol. 155, no. 6. P. 3600–3605. doi: 10.1121/10.0026222.
4. Shljahin D. A., Savvinova E. V. Svjazannaja nestacionarnaja osesimmetrichnaja zadacha termojelektro-uprugosti dlja krugloj p'ezokeramicheskoj sharnirno zakreplenoj plastiny // Vestn. SamGTU. Fiz.-mat. nauki. 2023. T. 27, № 1. S. 159–178. doi: 10.14498/vsgtu1959. (In Russ.).
5. Ferroelectric ceramics and composites for piezoelectric transducer applications / A. Safari, E. K. Akdoğan, J. D. Leber // Jap. J. of Appl. Phys. 2022. Vol. 61, no. SN. P. SN0801. doi: 10.35848/1347-4065/ac8bdc.
6. Thermal management in piezoelectric transducers via anisotropic heat conduction / F. Li, J. Chen, X. Wang, Y. Liu // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2021. Vol. 68, no. 10. P. 3121–3130. doi: 10.1109/TUFFC.2021.3097321.
7. Sutyrina L. V., Karaseva T. V., Pimenov V. N. Modelirovanie p'ezokeramicheskogo jelementa s volnovodom s pomoshh'ju ANSYS // Privolzhskij nauch. vestn. 2016. № 12-2 (64). S. 85–92. doi: 10.17117/nv.2016.12.02.024. (In Russ.).
8. Ermolaev Je. V., Mahov V. I. Analiz raboty i raschet p'ezokeramicheskogo sterzhnja s nakladkoj pri ispol'zovanii konechno-jelementnogo modelirovanija // Tr. Krylovskogo GNC. 2019. Specvyp. 2. S. 263–268. doi: 10.24937/2542-2324-2019-2-5-1-263-268. (In Russ.).
9. Opređenje modula uprugosti materialov impedansnym metodom / A. V. Azin, S. V. Ponomarev, S. V. Rikonen, A. V. Vasil'ev // Kosmicheskie apparaty i tehnologii. 2025. № 1. S. 5–13. doi: 10.26732/j.st.2025.1.01. (In Russ.).
10. Davydov D. A., Neruk V. Ju., Pivnev P. P. Issledovanie impedansa širokopolosnogo akusticheskogo p'ezopreobrazovatelja, sostavlenno go iz raznochastotnyh izluchatelej (kratkoe soobshhenie) // Nauch. pribo-rostroenie. 2023. T. 33, № 4. S. 56–59. doi: 10.18358/np-33-4-i7884. (In Russ.).
11. Pan'kov A. A. Vlijanie mehanicheskoj nagruzki na rezul'tirujushhie p'ezomoduli kompozita // Vestn. PNIPU. Mehanika. 2022. № 3. S. 156–165. doi: 10.15593/perm.mech/2022.3.07. (In Russ.).
12. Muhsin H. K. M., Pivnev P. P., Kaljuta V. I. Obzor širokopolosnyh gidroakusticheskij preobrazovatelej na osnove p'ezokompozitov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2025. T. 18, № 3. S. 28–43. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-28-43. (In Russ.).

Information about the authors

Alsaeed Haider Kareem Muhsen – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: mukhsin@sfnedu.ru

Petr P. Pivnev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: pivnevpp@sfnedu.ru

Vladimir I. Kalyuta – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment, researcher. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: kalyuta@sfnedu.ru

Статья поступила в редакцию 20.08.2025; принята к публикации после рецензирования 26.10.2025; опубликована онлайн 30.12.2025.

Submitted 20.08.2025; accepted 26.10.2025; published online 30.12.2025.