

Обзор широкополосных гидроакустических преобразователей на основе пьезокомполитов

Х. К. М. Мухсин, П. П. Пивнев[✉], В. И. Калюта

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

[✉] pivnevpp@sfedu.ru

Аннотация. В настоящей статье представлен подробный и систематический обзор современных пьезоэлектрических широкополосных композиционных элементов с особым акцентом на их применении в высокочастотных гидроакустических системах. Детально описаны структура и принцип действия пьезокомполитных преобразователей, включая анализ их конструктивных особенностей, геометрических параметров и материалов – таких, как керамические пьезоэлектрики и полимерные матрицы, используемых при их производстве. Приведены результаты исследований основных электроакустических характеристик преобразователей из пьезокомполитов, включая частотный диапазон, коэффициент электро-механической связи, эффективность преобразования энергии и диаграммы направленности. Рассмотрено влияние композитной структуры, топологии электродов и методов поляризации на эксплуатационные свойства устройств. Обсуждаются перспективы использования новых материалов, например наноструктурированных композитов, для улучшения характеристик преобразователей. Сделан вывод о значительных перспективах научно-технического развития в области создания широкополосных высокочастотных гидроакустических преобразователей и антенн на основе пьезокомполитов, отмечена их важность для современных технологий подводной связи, зондирования, медицинской ультразвуковой диагностики и неразрушающего контроля. Рассмотрены направления совершенствования конструкции и материалов, включая аддитивные технологии и многослойные структуры, для повышения производительности и расширения функциональных возможностей таких систем.

Ключевые слова: пьезокомполиты, пьезоэлектрический композит 1–3, широкополосные преобразователи

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

Review of Broadband Hydroacoustic Transducers Based on Piezocomposites

H. K. M. Muhsen, P. P. Pivnev[✉], V. I. Kaliuta

Southern Federal University, Taganrog, Russia

[✉] pivnevpp@sfedu.ru

Abstract. This paper presents a detailed and systematic review of modern piezoelectric broadband composite elements, with special emphasis on their application in high-frequency hydroacoustic systems. The structure and principle of operation of piezocomposite transducers are described in detail, including analyses of their design features, geometrical parameters and materials used in their manufacture, such as ceramic piezoelectrics and polymer matrices. The results of studies of the main electroacoustic characteristics of transducers made of piezocomposites are presented, including frequency range, electromechanical coupling coefficient, energy conversion efficiency and directivity diagrams. The influence of composite structure, electrode topology and polarisation methods on the operational properties of the devices is considered. The prospects of using new materials such as nanostructured composites to improve the performance of transducers are discussed. The conclusion is made

about significant prospects of scientific and technical development in the field of creation of broadband high-frequency hydroacoustic transducers and antennas based on piezocomposites, their importance for modern technologies of underwater communication, sounding, medical ultrasonic diagnostics and non-destructive testing is noted. The directions of improvement of design and materials, including additive technologies and multilayer structures, to increase the performance and expand the functional capabilities of such systems are considered.

Keywords: piezocomposites, piezoelectric composite 1–3, broadband transducers

For citation: Muhsen H. K. M., Pivnev P. P., Kaliuta B. I. Review of Broadband Hydroacoustic Transducers Based on Piezocomposites // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 28–43. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-28-43.

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

Введение. Пьезоэлектрические материалы используются при производстве ультразвуковых генераторов, датчиков, фильтров и исполнительных механизмов. Подавляющее большинство излучателей и приемников в гидроакустические техники выполнено из преобразователей на основе пьезокерамических преобразователей.

Существует огромное количество различных составов пьезоэлектрических материалов, среди самых популярных – PZT, ЦТС и ЦТБС. PZT считается относительно твердым материалом и способен выдерживать большое давление с точки зрения его физических свойств. Что касается химических свойств, то он считается инертным и не подвержен влиянию влажности и других погодных условий. Метод их изготовления хорошо отлажен, и как материал, преобразующий энергию, он обладает хорошими пьезоэлектрическими свойствами.

Подводные преобразователи имеют три важных параметра: полосу пропускания, рабочую частоту и амплитудно-частотную характеристику.

Для увеличения дальности и пространственного разрешения в сонарах все большее практическое применение находят широкополосные сигналы в виде импульсов с линейной частотной модуляцией [1].

Основная часть. К распространенным способам совершенствования широкополосных преобразователей для сонаров относится модификация пьезоэлектрических свойств материала и использование теории многомодовой связи [2]–[5]. Этот подход направлен на расширение полосы пропускания преобразователя, что критически важно для повышения разрешающей способности и качества получаемых изображений. Классический подход, основанный на монолитных пьезоэлектрических материалах, ограничивает полосу пропускания из-за высоких механических добротностей. Для преодоления этого ограничения при-

меняются два основных метода: модификация материала и многомодовое связывание.

Пьезоэлектрические свойства модифицируются преимущественно заменой традиционных пьезокерамик композиционными материалами [6]–[9]. Это позволяет контролировать и оптимизировать акустические и электромеханические характеристики преобразователя. Добавление упругих полимеров к пьезокерамике, например в композитах типа 1–3, приводит к существенному снижению механической добротности за счет увеличения диэлектрических и механических потерь [10]. Этот эффект, несмотря на кажущийся недостаток (потери энергии), способствует значительному расширению полосы пропускания. Концепция таких композиционных материалов, предложенная в 1970-х гг., предполагает оптимизацию геометрического пространственного распределения пьезокерамических и полимерных фаз, что позволяет точно настраивать их весовые и объемные доли для достижения требуемых характеристик [11]. Трехмерная структура полимерной матрицы в композитах типа 1–3 обеспечивает эффективное демпфирование механических колебаний, что, в свою очередь, способствует расширению полосы пропускания.

Многомодовое связывание [12] – второй ключевой аспект повышения широкополосности. Этот подход основан на объединении чувствительных элементов различной структуры, которые генерируют колебания в различных частотных диапазонах. Взаимодействие этих элементов (мод) приводит к расширению суммарной полосы пропускания преобразователя [13]. Эффективность многомодового связывания определяется геометрией элементов, их материалами и характером взаимодействия между ними. Добавление трехмерного непрерывного полимерного материала к одномерному пьезоэлектрическому может

привести к изготовлению пьезоэлектрического композиционного материала типа 1–3 с ростом потерь преобразователя и увеличения полосы пропускания [14].

Пьезокомпозиты 1–3 – это материалы, обычно представляющие собой двухфазную систему параллельно расположенных поляризованных пьезокерамических стержней квадратного или круглого сечения в органической (непьезокерамической) матрице на основе эпоксидной смолы (рис. 1). Пьезокомпозиты связности 1–3 отличаются от монолитной (непористой) керамики повышенной анизотропией ряда пьезоэлектрических характеристик d_{33}/d_{31} , g_{33}/g_{31} , k_t/k_p и k_{33}/k_p .

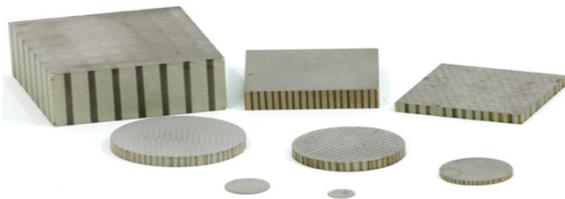


Рис. 1. Пьезокомпозиты 1–3
Fig. 1. Piezo Composites 1–3

Изменение концентрации пьезокерамических стержней в представленных материалах позволяет в достаточно широких пределах регулировать их электрофизические параметры (диэлектрическую проницаемость, пьезомодули d_{31} и d_{15} , коэффициенты электромеханической связи k_p , k_p , k_{31} и акустическое сопротивление Z_a).

Пьезоэлектрические композитные материалы синтезируются с применением разнообразных методов, включая помимо прочего технологии прецизионной резки и заполнения пустот, методы перестановочного литья (например, инфльтрационное литье), лазерную абляцию и ультразвуковую обработку, а также литье под давлением [15]–[20]. Выбор конкретного метода определяется требуемой морфологией композита, размерами и формой пьезоэлектрических элементов, а также характеристиками матричного материала. Эти методы позволяют создавать композиты с контролируемой микроструктурой, варьируя объемную долю пьезоэлектрической фазы и геометрию включений.

Экспериментальные исследования [21], [22] демонстрируют корреляционную зависимость между акустическим импедансом, диэлектрической проницаемостью и пьезоэлектрическими коэффициентами композитного материала типа 1–3 и объемной долей пьезокерамической фазы. Наблюдаемая линейная зависимость свидетель-

ствует о преобладающем влиянии объемной доли пьезокерамики на макроскопические электромеханические свойства композита в указанном диапазоне концентраций. Более того, достижение высоких значений коэффициента электромеханической связи возможно при использовании пьезоэлектрических композитов 1–3 с объемной долей пьезокерамики в интервале от 20 до 80 % [23]. Этот диапазон оптимален с точки зрения компромисса между увеличением пьезоэлектрического отклика и сохранением достаточной механической прочности и гибкости композита. Дальнейшие исследования требуются для оптимизации структуры и состава композита с целью повышения эффективности преобразования энергии и расширения функциональных возможностей материала.

Основные параметры материала, используемого в пьезоэлектрических преобразователях, определяются коэффициентом электромеханической связи k_{ij} и пьезоэлектрическими модулями, в частности пьезоэлектрическим коэффициентом заряда d_{ij} или коэффициентом пьезоэлектрической деформации g_{ij} . Эти параметры напрямую коррелируют с чувствительностью и полосой пропускания пьезоэлектрического устройства. Чувствительность определяется эффективностью преобразования механической энергии в электрическую (или наоборот) и, следовательно, зависит от значения пьезоэлектрического модуля. Полоса пропускания, в свою очередь, определяется механическими и электрическими характеристиками материала, включая его резонансную частоту, которая связана с упругими свойствами и геометрическими параметрами преобразователя.

Согласно имеющимся данным [24], пьезоэлектрический коэффициент заряда d_{33} демонстрирует тенденцию к увеличению при объемной доле керамической фазы до 40 %. При достижении данной концентрации наблюдается насыщение, и дальнейшее увеличение объемной доли керамики не приводит к существенному росту d_{33} . Это явление может быть объяснено микроструктурными изменениями композитного материала изменением размера и морфологии пьезоэлектрических зерен, а также межфазного взаимодействия между керамической и матричной фазами. Более детальное исследование требует анализа таких параметров, как диэлектрическая проницаемость ϵ_{ij} , упругие модули, а также микроструктурного анализа с применением методов сканирующей электронной микроскопии (SEM) и

рентгеновской дифракции (XRD) для установления корреляции между микроструктурой и макроскопическими пьезоэлектрическими свойствами. Наблюдаемая стабилизация d_{33} после объемной доли керамики 40 % может быть обусловлена достижением оптимальной плотности и однородности распределения пьезоэлектрических фаз в композите, за пределами которой дальнейшее увеличение концентрации керамики приводит к снижению эффективности поляризации и образованию дефектов структуры.

Основными параметрами материала для пьезопреобразователей является коэффициент электромеханической связи и пьезоэлектрический коэффициент заряда или относительной деформации, которые тесно связаны с чувствительностью и полосой пропускания устройства. Согласно большинству результатов, пьезоэлектрический коэффициент заряда d_{33} имеет тенденцию к увеличению в пределах 40 % объемной доли керамики и стабилизируется после 40 % [24].

Пьезомодуль d_{ij} (пьезоэлектрический коэффициент заряда или относительной деформации) – отношение механической деформации к приложенному электрическому полю или индуцированный электрический заряд на механическое напряжение (Кл/Н):

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s},$$

где Δx_s – изменение толщины пластины, м; U_s – приложенное напряжение, В.

Полезно помнить, что большие значения d_{ij} приводят к большим механическим смещениям (деформациям), что обычно добивается при проектировании ультразвуковых преобразователей. d_{33} применяют, когда сила направлена в направлении оси поляризации, d_{31} – когда сила прикладывается под прямым углом к оси поляризации, при этом заряд возникает на электродах, как и в предыдущем случае.

Наиболее распространено использование PZT4, PZT5 и сегнетоэлектрического монокристалла в качестве пьезоэлектрических фазовых материалов. Что касается полимерных фазовых материалов, то наиболее часто используются эпоксидная смола и полиуретан.

Пьезоэлектрические композиционные материалы типа 1–3 демонстрируют ряд преимуществ перед монокристаллическими пьезоэлектрическими материалами, обусловленных их уникальной микро-

структурой. Помимо низкого акустического импеданса Z , что способствует эффективному согласованию импеданса с окружающими средами, и пониженной плотности, обеспечивающей снижение массы устройства, композиты 1–3 характеризуются повышенным эффективным коэффициентом электромеханической связи k_{eff} . Это увеличение обусловлено оптимизированным распределением пьезоэлектрической фазы в матрице, что обеспечивает более эффективное преобразование механической энергии в электрическую и наоборот. В частности, геометрия элементов пьезокерамической фазы и их взаимное расположение существенно влияют на значение k_{eff} .

Низкая механическая добротность Q композиционного материала по сравнению с монокристаллической пьезокерамикой – важный фактор, определяющий расширение полосы пропускания пьезоэлектрического преобразователя [25]. Механическая добротность характеризует способность материала накапливать и рассеивать механическую энергию. Низкое значение Q указывает на значительные диссипативные процессы в материале, приводящие к уменьшению резонансных пиков и расширению полосы частот, в которой преобразователь эффективно функционирует. Это особенно важно для приложений, требующих широкой полосы пропускания, – например, медицинской ультразвуковой визуализации или гидроакустики. Снижение Q в композитах 1–3 связано с присутствием матричного материала, который вносит дополнительные механические потери и снижает резонансную частоту отдельных пьезоэлектрических элементов. Более детальный анализ требует учета влияния различных параметров – таких, как геометрия элементов, свойства матрицы и характер межфазного взаимодействия на величину Q_m и, соответственно, на ширину полосы пропускания.

Механическую добротность преобразователя можно выразить как

$$Q = \frac{\omega M}{R} = \frac{f_r}{\Delta f},$$

где Q – механическая добротность материала; ω – круговая частота; M – эквивалентная масса преобразователя; R – сумма сопротивлений потерь материала; f_r – резонансная частота преобразователя; Δf – полоса частот (по уровню –3 дБ). Из уравнения видно, что увеличение потерь может снизить механическую добротность преобразова-

теля. Из этого уравнения видно, что уменьшение механической добротности материала расширяет полосу пропускания преобразователя. Таким образом, добавление гибкого полимера к пьезоэлектрическому материалу может расширить полосу пропускания преобразователя.

У излучающих преобразователей, как правило, для повышения эффективности передачи механические потери должны быть большими. Однако иногда требуется увеличение полосы пропускания и уменьшение Q . Добавление гибкого полимера служит одним из эффективных способов снижения эквивалентной плотности преобразователя, при этом акустическое согласование улучшается.

Широкополосные и высокочастотные преобразователи энергии – это перспективное направление исследований в области гидроакустики, обеспечивающим существенное повышение эффективности подводного обнаружения и связи [26]. Ключевое технологическое ограничение разработки высокоэффективных широкополосных преобразователей – это несоответствие акустических импедансов пьезоэлектрических материалов и водной среды. Данное несоответствие приводит к значительным потерям энергии на границе раздела сред, существенно снижая эффективность преобразования электромеханической энергии в акустическую и, как следствие, уменьшая интенсивность излучаемого сигнала [27]. Для оптимизации процесса передачи энергии необходима разработка эффективных методов согласования импедансов.

В гидроакустических обзорно-поисковых системах и системах связи, функционирующих в высокочастотном диапазоне, рабочая частота высокопроизводительных преобразователей, как правило, превышает 100 кГц [28]. Это обусловлено необходимостью достижения высокой пространственной разрешающей способности и увеличения дальности действия за счет меньшей длины волны. Однако работа в высокочастотном диапазоне предъявляет повышенные требования к точности изготовления и стабильности характеристик преобразователей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых материалов и конструкций преобразователей, обеспечивающих эффективное согласование импедансов, широкую полосу пропускания и высокую эффективность преобразования энергии в указанном частотном диапазоне.

Миниатюризация высокочастотных преобразователей, обусловленная обратной зависимостью между их механическими размерами и резонансной частотой, создает значительные сложности при реализации широкополосности. Высокое соотношение резонансных частот и малые геометрические размеры ограничивают применимость методов расширения полосы пропускания, эффективных для низкочастотных преобразователей. Прямое масштабирование методик, используемых для низкочастотного диапазона, на высокочастотный оказывается неэффективным.

Традиционный подход к расширению полосы пропускания высокочастотных преобразователей заключается в применении согласующих слоев, размещаемых перед пьезоэлектрическими компонентами [29]. Введение согласующего слоя призвано оптимизировать импедансное согласование между пьезоэлементом и окружающей средой, что, однако, часто приводит к формированию сложной частотной характеристики с двумя (или более) резонансными пиками. Наличие нескольких резонансов, хотя и способствует расширению полосы пропускания, сопровождается снижением эффективности преобразования в отдельных частотных поддиапазонах и усложняет управление амплитудно-частотной характеристикой. Это требует более детального исследования оптимальных параметров согласующих слоев, включая их толщину, акустический импеданс и конструктивные особенности, с целью минимизации негативного влияния многорезонансного эффекта и достижения требуемых параметров широкополосности при сохранении высокой эффективности преобразования. Кроме того, необходимо изучить такие альтернативные методы расширения полосы пропускания, как использование новых конструктивных решений, например многослойных пьезоэлектрических структур с оптимизированными геометрическими параметрами, а также применение метаматериалов для управления акустическим импедансом.

Поскольку механический размер преобразователя обычно обратно пропорционален резонансной частоте, возникают некоторые трудности при превращении высокочастотного преобразователя в широкополосный преобразователь, т. е. резонансная частота преобразователя имеет высокое соотношение и механический размер преобразователя меньше, поэтому при применении метода расширения полосы частот широкополосного низкочастотного преобразователя на высо-

кочастотном преобразователе сталкиваются с некоторыми трудностями. Обычно добавление согласующего слоя перед пьезоэлектрическими композиционными материалами используется для расширения полосы пропускания высокочастотного преобразователя [30], что приводит к появлению двух резонансных пиков и позволяет достичь цели расширения полосы пропускания.

В отсутствие согласующего слоя акустическое сопротивление нагрузки, обусловленное водной средой, эквивалентно поверхностному акустическому импедансу преобразователя. Это приводит к образованию значительного отражения акустической энергии на границе раздела «преобразователь–вода», что ограничивает эффективность преобразования энергии и ширину рабочей полосы частот. Введение согласующего слоя с определенным характеристическим акустическим импедансом Z_c между преобразователем и водной средой модифицирует условия на границе раздела. В этом случае полное акустическое сопротивление нагрузки представляет собой сложную функцию, зависящую от импедансов преобразователя Z_p , согласующего слоя Z_c и водной среды Z_w . В частности, полное сопротивление определяется распределением акустической энергии внутри многослойной структуры и может быть рассчитано с использованием матричного метода передачи или других методов решения волнового уравнения для многослойных сред.

Введение согласующего слоя создает условия для возникновения двух резонансных частот. Эти резонансы обусловлены интерференцией прямых и отраженных акустических волн в слое, причем положение резонансных частот определяется толщиной согласующего слоя d_c , его характеристическим акустическим импедансом Z_c , а также импедансами преобразователя Z_t и воды Z_w . Расширение рабочей полосы частот достигается подбором параметров согласующего слоя d_c и Z_c таким образом, чтобы резонансные частоты располагались вблизи центральной частоты работы преобразователя, обеспечивая тем самым более равномерную амплитудно-частотную характеристику. Оптимизация параметров согласующего слоя может быть осуществлена методами численного моделирования, позволяющими определить оптимальную толщину и акустический импеданс, обеспечивающие максимальную передачу энергии в заданном диапазоне частот.

Однако использование согласующих слоев сопряжено с определенными ограничениями, связанными с их долговечностью и стабильностью характеристик. Процессы старения, включающие, например, деградацию материала согласующего слоя под воздействием внешних факторов (температура, влажность, давление), приводят к изменению его акустических свойств, что, в свою очередь, вызывает снижение эффективности преобразователя и нестабильность его работы. Это ограничение обуславливает необходимость разработки стабильных и долговечных согласующих слоев, способных выдерживать длительную эксплуатацию в жестких условиях. Исследование материалов и технологий изготовления таких слоев является важной задачей для повышения надежности и долговечности акустических преобразователей.

Без добавления согласующего слоя устойчивость к водной нагрузке равна поверхностному сопротивлению преобразователя. После добавления согласующего слоя с определенным характеристическим акустическим сопротивлением к поверхности звукового излучения преобразователя водная нагрузка имеет сопротивление, создаваемое согласующим слоем, плюс поверхностное сопротивление материала преобразователя. Он создает две резонансные частоты из-за разницы в импедансах. Что касается приближения резонансных частот до степени, позволяющей связать расширить рабочую полосу материала, то это достигается регулированием толщины согласующего слоя [31].

Поскольку слои согласования при старении способствуют снижению производительности и приводят к нестабильности преобразования, его использование несколько ограничено.

Использование одного или нескольких равномерно согласованных слоев обычно не позволяет достичь идеальной передачи акустического импеданса и, следовательно, не может удовлетворить требования к сверхширокополосным характеристикам преобразователя в воде. Исследователями был предложен материал согласующего слоя с акустической градиентной устойчивостью, который компенсирует этот недостаток, поскольку материал согласующего слоя с градиентной устойчивостью имеет свойство уменьшать акустический импеданс в направлении толщины [32].

В [33] представлен экспериментальный анализ пьезоэлектрического композитного преобразователя типа 1–3 с геометрическими размерами $254 \times 254 \times 6.35$ мм (рис. 2). Анализ основывается на исследовании частотной характеристики

передаточной функции по напряжению. Полученные результаты демонстрируют линейный рост амплитуды передаточной функции напряжения в диапазоне частот от 1 до 100 кГц. Коэффициент наклона линейной аппроксимации в указанном диапазоне частот остается практически постоянным, что свидетельствует о стабильности характеристик преобразователя в данной области. Максимальное значение передаточной функции по напряжению достигается на частоте 100 кГц и составляет 180 дБ (рис. 3). Высокое значение передаточной функции указывает на эффективность преобразования механической энергии в электрическую в исследуемом диапазоне частот. Дальнейшие исследования могли бы быть направлены на выявление причин отклонения от линейной зависимости при частотах, выходящих за пределы 1...100 кГц, а также на анализ влияния геометрических параметров и материала композита на характеристики преобразователя. Возможно, нелинейность на более высоких частотах обусловлена резонансными явлениями или эффектами рассеяния в структуре композита. Для более глубокого анализа рекомендуется провести моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с учетом параметров материала и геометрии преобразователя, что позволит получить количественные оценки внутренних напряжений и деформаций, а также уточнить механизм работы преобразователя.

В [34] исследовалось взаимодействие фундаментальной толщинной моды f_b , первой поперечной моды f_{11} и третьей толщинной моды f_{13} в пьезокомпозитном преобразователе типа 1–3. Анализ показал, что совпадение или близкое расположение частот этих мод (на рис. 4 представлен адмиттанс расчетных спектров) приводит к расширению полосы пропускания преобразователя.

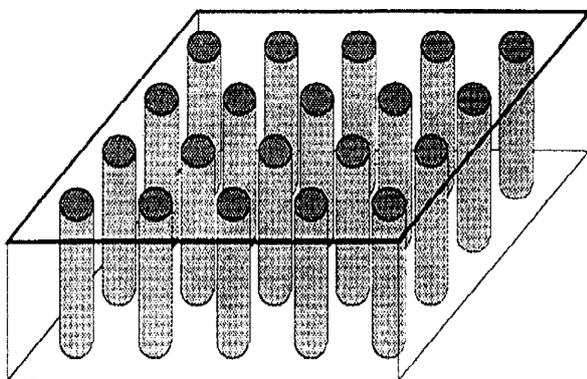


Рис. 2. Пьезоэлектрический композитный преобразователь типа 1–3 (размеры: 254 × 254 × 6.35 мм) [33]

Fig. 2. Piezoelectric composite transducer type 1–3 (dimensions: 254 × 254 × 6.35 mm) [33]

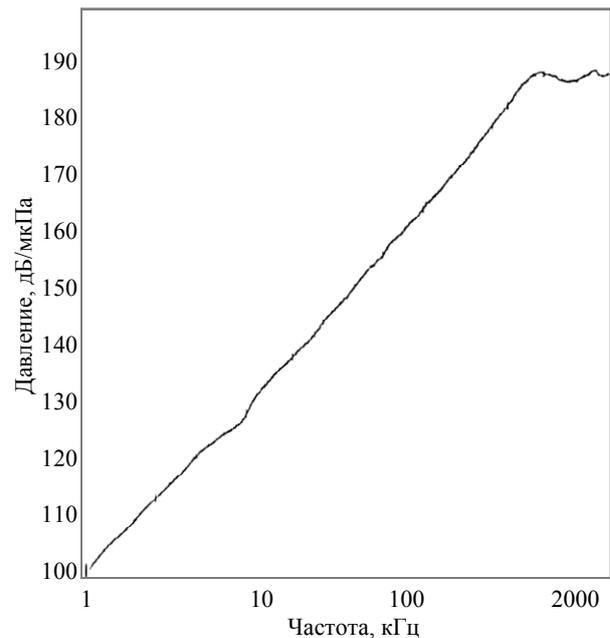


Рис. 3. Частотная характеристика передаточной функции по напряжению пьезоэлектрического композитного преобразователя [33]

Fig. 3. Frequency response of the voltage transfer function of a piezoelectric composite transducer [33]

Это явление обусловлено конструктивной интерференцией акустических волн, генерируемых указанными модами. В частности, взаимодействие мод способствует расширению высокочастотного диапазона полосы пропускания, тогда как включение второй моды обеспечивает более плавный переход и расширение низкочастотной области. Полученные экспериментальные данные (рис. 5, показывающий частотную характеристику преобразователя) подтверждают эффективность предложенного подхода. Наблюдаемое значительное расширение полосы пропускания (–3 дБ) по сравнению с преобразователями, работающими на основе одной основной моды, составляет $\Delta f = 361$ кГц, что свидетельствует о высокой эффективности использования мультимодового режима работы. Более того, анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) (рис. 5) демонстрирует относительно равномерную амплитуду в пределах расширенной полосы пропускания, что указывает на высокое качество широкополосных характеристик. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию геометрических параметров преобразователя для достижения еще более широкой и равномерной полосы пропускания точным подбором соотношения частот.

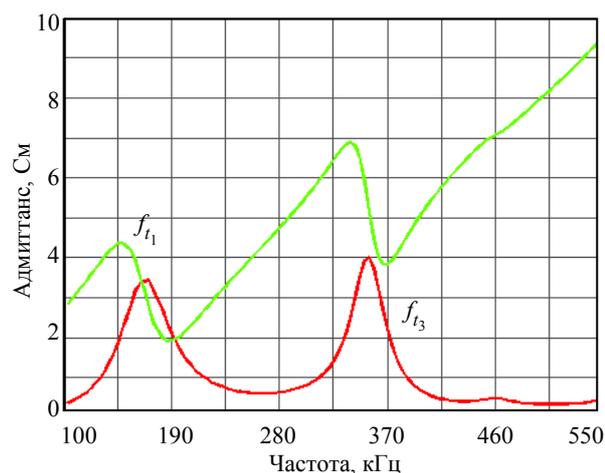


Рис. 4. Адмиттанс широкополосного пьезокомпозитного преобразователя 1–3 в воде [34]

Fig. 4. Admittance of a 1–3 piezocomposite broadband transducer in water [34]

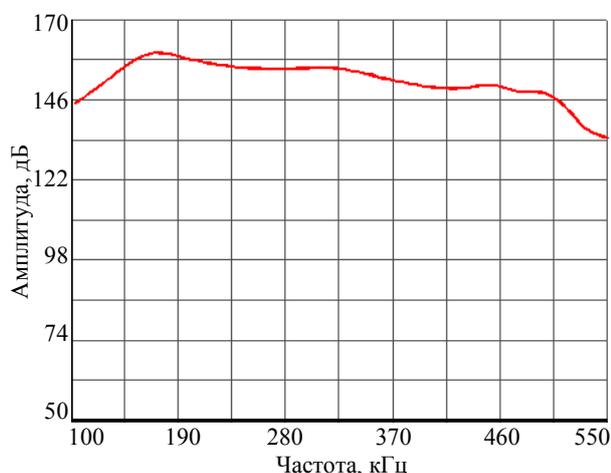


Рис. 5. Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика пьезокомпозитного преобразователя типа 1–3, демонстрирующая расширенную полосу пропускания [34]

Fig. 5. Experimental amplitude-frequency response of a piezocomposite transducer of type 1–3, demonstrating an extended bandwidth [34]

В [35] представлен анализ широкополосного широколучевого композитного пьезоэлектрического подводного акустического преобразователя типа 1–3, предназначенного для применения в системах подводной акустической связи. Ключевая особенность конструкции на рис. 6 состоит в интеграции согласующего слоя, оптимизирующего передачу акустической энергии между пьезоэлектрическим элементом и водной средой. В данной статье авторы не ограничиваются простым описанием конструкции, а проводят детальное исследование влияния параметров согласующего слоя на характеристики преобразователя. Анализируются: 1) зависимость ширины полосы пропускания от импедансных характеристик согла-

сующего слоя; 2) влияние толщины и акустического импеданса согласующего материала на коэффициент преобразования энергии; 3) влияние геометрических параметров согласующего слоя (например, формы и размера) на диаграмму направленности излучения. Вероятно, для моделирования и оптимизации параметров преобразователя использовались методы численного моделирования – методы конечных (МКЭ) или граничных (МГЭ) элементов, что позволило авторам [35] получить количественные оценки влияния согласующего слоя на ключевые характеристики преобразователя. Результаты моделирования, вероятно, были подтверждены экспериментальными измерениями, включающими определение частотно-зависимых характеристик (АЧХ и ФЧХ) и пространственного распределения звукового давления (диаграмма направленности). Представление результатов, вероятно, включало сравнение характеристик преобразователя с согласующим слоем и без него, что позволило количественно оценить эффективность внедрения согласующего слоя и обосновать выбор его параметров. Высокая эффективность преобразователя, скорее всего, достигается за счет согласования акустических импедансов пьезоэлектрического материала, согласующего слоя и окружающей водной среды, что минимизирует отражения на границах раздела и максимизирует передачу акустической энергии в воду. Полученные в [35] результаты имеют важное значение для разработки высокоэффективных широкополосных подводных акустических преобразователей для различных применений, включая связь, гидролокацию и океанографические исследования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию конструкции с учетом других факторов – температурной стабильности, долговечности и механической прочности.

В [36] представлен электромеханический преобразователь, основанный на энергетическом методе анализа и использующий аксиально-симметричные колебания тонкостенных пьезоэлектрических керамических трубок. Анализ, проведенный авторами [36], сосредоточен на исследовании резонансных характеристик преобразователя, определяемых геометрическими параметрами трубки (a – радиус основания цилиндра, t – толщина, h – высота, ось r – радиус в цилиндрической системе координат, ось φ – представляет собой

угол в плоскости перпендикулярной оси цилиндра, ось x – осевое расстояние или h), материальными свойствами пьезокерамики (диэлектрической проницаемостью, пьезоэлектрическими константами, коэффициентом электромеханической связи) и граничными условиями (рис. 7).

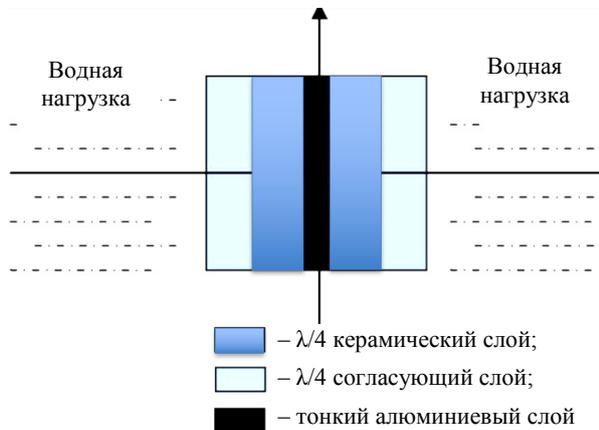


Рис. 6. Схематическое изображение композитного пьезоэлектрического преобразователя с указанием всех слоев, включая пьезоэлектрический элемент и согласующий слой [35]

Fig. 6. Schematic representation of the composite piezoelectric transducer showing all layers including the piezoelectric element and the matching layer [35]

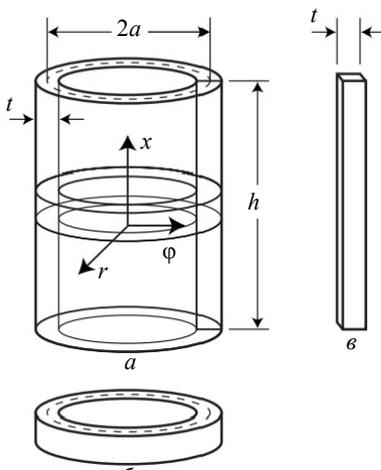


Рис. 7. Тонкостенная эластичная трубка a и ее частичные подсистемы: радиально колеблющееся короткое кольцо $б$ и продольно колеблющийся тонкий стержень $в$ [36]

Fig. 7. Thin-walled elastic tube a and its partial subsystems: radially oscillating short ring $б$ and longitudinally oscillating thin rod $в$ [36]

Применение энергетического метода позволило авторам [36] определить эффективную электромеханическую связь преобразователя, проанализировать распределение механических напряжений и деформаций в пьезокерамической трубке при резонансных частотах. Результаты, представленные в виде аналитических выражений (кривые

a, b, c) и численных расчетов (кривые $\theta, 2$) (рис. 8), показывают высокую чувствительность резонансной частоты к изменениям геометрических размеров трубки. Более того, анализ распределения механических напряжений выявил критические зоны в структуре преобразователя, где происходит максимальная концентрация напряжений, что необходимо учитывать при проектировании и изготовлении устройства для предотвращения появления трещин и разрушения.

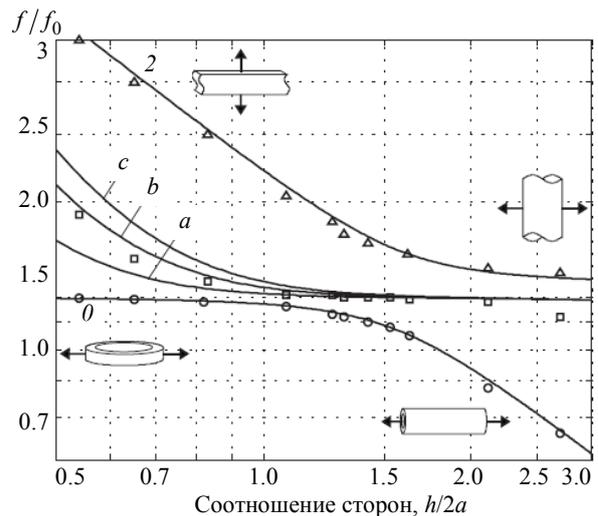


Рис. 8. Нормированные резонансные частоты трубки PZT-4 рассчитанные в первом приближении при различной толщине стенки [36]

Fig. 8. Normalized resonant frequencies of the PZT-4 tube calculated in the first approximation for different wall thicknesses [36]

Авторы [36] также исследовали влияние температуры и воздействия внешних факторов на параметры преобразователя. Полученные данные позволяют оценить стабильность работы преобразователя в различных условиях эксплуатации и разработать эффективные методы компенсации влияния паразитных факторов. В заключение, [36] представляет собой ценный вклад в теорию и практику проектирования пьезоэлектрических электромеханических преобразователей на основе аксиально-симметричных колебаний тонкостенных трубок.

В [37], [38] представлено описание преобразователей с полосой пропускания, превышающей одну октаву, достигаемой за счет интеграции согласующего слоя в пьезоэлектрический композитный материал типа 1–3. Это позволило существенно расширить рабочую частотную полосу по сравнению с традиционными конструкциями. Дальнейшее развитие данной технологии привело к созданию высокочастотного широкополосного преобразователя на основе комбинации двух ти-

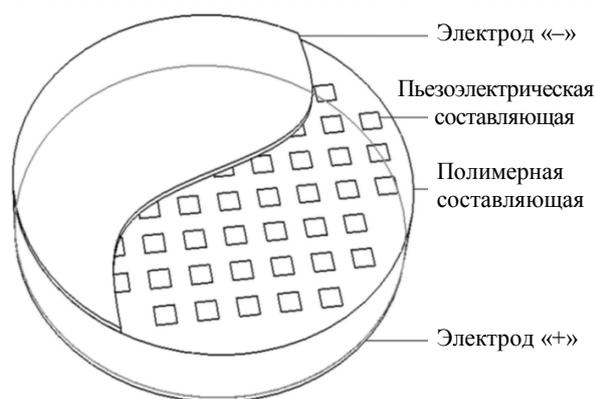


Рис. 9. Конструкция преобразователя с несимметричным возбуждением 1–1–3 [38]
 Fig. 9. Design of a converter with asymmetric excitation 1–1–3 [38]

пов пьезокомпозитных структур: преобразователя с модой 1–3 и преобразователя с несимметричным возбуждением 1–1–3 (рис. 9).

Включение преобразователя второго типа, характеризующего асимметричной геометрией электродов и, следовательно, отличными характеристиками импеданса, позволяет оптимизировать АЧХ в расширенной полосе частот. Анализ эквивалентных схем обоих типов преобразователей, учитывающий паразитные емкости и индуктивности, позволяет объяснить наблюдаемое расширение полосы пропускания. В частности, введение несимметричной структуры 1–1–3 компенсирует резонансные провалы, присущие преобразователям с модой 1–3, что приводит к более плоской АЧХ в более широком диапазоне частот. Морфологический анализ микроструктуры композитов подтверждает соответствие изготовленных образцов заявленным параметрам, а именно, равномерное распределение пьезоэлектрических элементов в полимерной матрице для структуры 1–3 и специфическую геометрию электродов для структуры 1–1–3. Экспериментально полученные данные по центральной частоте, полосе пропускания по уровню –3 дБ и коэффициенту преобразования подтверждают эффективность предложенной конструкции и значительное превосходство над аналогами с более узкой полосой пропускания. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию геометрии и материала согласующего слоя для достижения еще более широкой полосы пропускания и повышения эффективности преобразования [39].

В [40], [36] описываются преобразователи, в которых расширили полосу пропускания, однако угол их луча невелик, поэтому такими преобразователя-

ми трудно обеспечить передачу или прием акустических сигналов под большим углом под водой. Таким образом, эти результаты меньше касаются проблемы расширения угла луча преобразователей.

Важными показателями работы подводных акустических преобразователей служат широкополосная и широколучевая характеристики. Преимущество широкополосного подводного высокочастотного акустического преобразователя заключается в передаче и приеме большего количества информации, а благодаря широкому диапазону частот и высокой частоте можно добиться увеличения дальности обнаружения системы.

Одно из преимуществ большого угла раскрытия луча состоит в том, что он обеспечивает передачу или прием акустических сигналов с большим углом раскрытия под водой.

Компания MSI расширила угол луча преобразователя, изготовив шесть рядов и четыре столбца дугообразной матрицы преобразователей, его рабочий диапазон составлял 8...16 кГц, угол горизонтального раскрытия – 150° [41]. Конструкция и характеристики высокочастотного широколучевого ультразвукового проектора из ПВДФ (поливинилиденфторида) для подводной связи были предложены в [42].

Для широкой полосы пропускания и широкого угла обзора высокочастотного преобразователя в [8] был разработан новый пьезоэлектрический композитный вибратор с крышкой в виде полусферы. Результаты показывают, что полоса пропускания преобразователя составляет 30 кГц, а ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ – 40°.

В [12] представлена многочастотная архитектура преобразователя, основанная на суперпозиции сигналов, что позволяет расширить полосу пропускания. Чувствительный элемент данного преобразователя имеет слоистую структуру и состоит из четырех 1–3-уровневых пьезоэлектрических композитных элементов различной толщины, геометрия которых отличается от традиционных конфигураций. Такая нестандартная форма элементов, как показано на рис. 10, обеспечивает управление пространственным распределением механических напряжений и, следовательно, влияет на спектральные характеристики преобразователя.

В [12] полоса пропускания расширяется за счет многочастотной архитектуры суперпозиции. Чувствительный элемент преобразователя состоит из четырех слоев 1–3-уровневых пьезоэлектрических композитных чувствительных элемен-

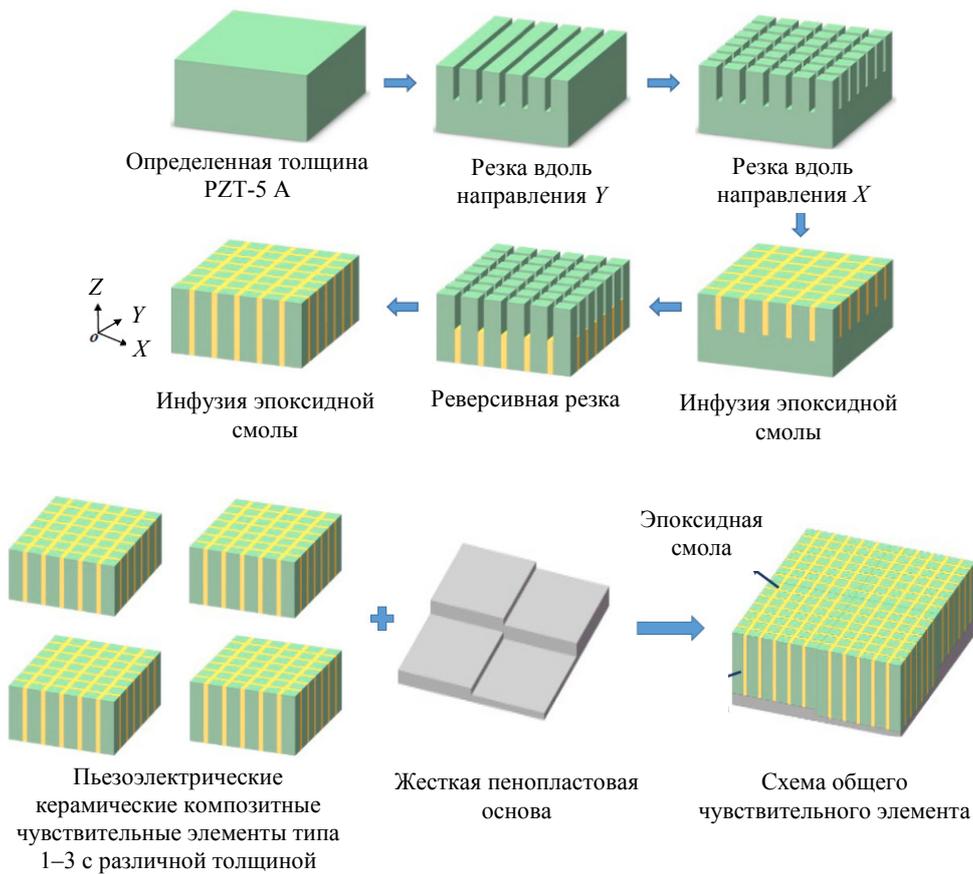


Рис. 10. Структурная схема чувствительного элемента
Fig. 10. Structural diagram of the sensitive element

тов разной толщины в структуре своеобразной формы. Результаты показали обратную зависимость между резонансной частотой и толщиной пьезоэлектрического микростолба с учетом некоторых других условий.

В этом исследовании полоса пропускания расширяется за счет композитных материалов и многомодовой связи, а также применяется процесс формирования изогнутой поверхности. Разработанный здесь преобразователь имеет более низкую рабочую частоту, полуоктавную полосу пропускания, более высокое напряжение срабатывания и всенаправленное излучение звуковых волн в горизонтальном направлении по сравнению с другими усовершенствованными преобразователями [43].

31-модовое пьезоэлектрическое кольцо – наиболее часто используемый тороидальный преобразователь в настоящее время, но 33-модовое пьезоэлектрическое кольцо может обеспечить больший коэффициент связи, выходную мощность и широкую рабочую полосу пропускания [44]–[46]. Чтобы максимизировать заранее заданную добротность предполагаемого применения, 33-модовый пьезокомпозитный материал использует высокую пьезоэлектрическую энергию кера-

мики и низкий акустический импеданс податливого полимера [47].

В ходе исследования [48] была разработана подводная трехфазная многослойная пьезоэлектрическая композитная кольцевая решетка. Результаты экспериментов показывают, что максимальное напряжение передачи составляет 154 дБ, угол раскрытия горизонтального луча – до 360°, а полоса пропускания по уровню –3 дБ – 86 кГц.

Заключение. Приведенный анализ литературных источников демонстрирует значительный прогресс, достигнутый исследователями в области создания пьезокомпозитных широкополосных преобразователей. Однако, несмотря на существующий задел, практическая реализация таких преобразователей сталкивается с многочисленными трудностями технологического характера. Сложности возникают на всех этапах производства, от подбора оптимального состава пьезокомпозита и обеспечения его однородности до минимизации паразитных эффектов и повышения воспроизводимости характеристик. Среди наиболее значимых проблем можно выделить: сложность управления микроструктурой композита для достижения требуемых акустических импедансов и

полосы пропускания; высокую стоимость и сложность получения некоторых компонентов пьезокомпозитов; недостаточную стабильность характеристик во времени и под воздействием внешних факторов (температура, влажность, давление); ограниченную механическую прочность и хрупкость некоторых материалов.

Поэтому дальнейшие исследования в этой области крайне важны и должны быть направлены не только на расширение полосы частот высокочастотных преобразователей, но и на комплексное решение указанных технологических проблем. Усовершенствование существующих пьезокомпозитов требует глубокого понимания взаимосвязи между составом, микроструктурой и акустическими свойствами материала. Необходимо разработка новых методов синтеза и обработки пьезокомпозитов, обеспечивающих повышенную воспроизводимость, стабильность и надежность. Поиск альтернативных пьезоматериалов стал перспективным направлением исследований, способным преодолеть ограничения, присущие пьезокомпозитам.

Среди перспективных альтернатив заслуживают внимания пьезоэлементы на основе пористой керамики, обладающие регулируемыми акустическими свойствами за счет изменения пористости и размера пор. Пьезопленки предлагают возможность создания миниатюрных и гибких преобразователей с высокой частотой резонанса. Использование пьезоэлементов с различной плотностью по объему позволяет оптимизировать акустическое согласование и расширить полосу пропускания за счет управления распределением импеданса. Однако и для этих альтернативных материалов необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию их свойств, разработку технологических процессов и интеграцию в конструкции преобразователей. Только комплексный подход, включающий в себя как усовершенствование существующих, так и разработку новых пьезоматериалов и технологий их обработки, позволит создать высокоэффективные и надежные широкополосные преобразователи для широкого спектра применений.

Список литературы

1. Present and future piezocomposite technology in underwater sonar transducers / S. Cochran, P. Marin-Franch, D. Choi, M. P. Walsh, K. J. Kirk // *Proc. Institute of Acoustics*. 2005. Vol. 27(1). P. 1–13.
2. Wei T., Wang H., Su J. Design, analysis and testing of monometallic plate stepped broadband high sensitivity transducer // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 57(7). P. 075102. doi: 10.1088/1361-6463/ad0bc3.
3. Zhang K. The study of high-frequency broad-band underwater transducers // 2012 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Appl. (SPAWDA). Shanghai, China: IEEE, 2012. P. 408–410. doi: 10.1109/SPAWDA.2012.6464120.
4. Study on the broadband piezoelectric ceramic transducer based on radial enhanced composite structure / G. Li, J. H. Gong, T. Wang, C. R. Qiu, Z. Xu // *Ceram. Intern.* 2018. Vol. 44, no. 1. P. S250–S253. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.101.
5. The ANSYS simulation of a new-type high frequency broadband acoustic transducer / C. Li, H. W. Wang, L. Q. Wang // 6th Intern. Conf. Electr. Control. Eng. (ICECE2015) and 4th Intern. Conf. on Mat. Sci. and Manuf. (ICMSM2015). Shanghai, China: World Scientific, 2016. P. 412–418. doi: 10.1142/9789813100312_0058.
6. Research and fabrication of bimetallic plate transducer based on finite element analysis / Y. Lan, L. Xia, H. Wang, Z. Yu, Z. Shao, S. Jing // *Materials & Design*. 2024. Vol. 240. P. 112870. doi: 10.1016/j.matdes.2024.112870.
7. Smith W. A., Auld B. A. Modeling 1–3 composite piezoelectrics: thickness-mode oscillations // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* 1991. Vol. 38, no. 1. P. 40–47. doi: 10.1109/58.67833.
8. Novel piezoelectric composite spherical cap broadband transducer / C. Zhong, L. K. Wang, L. Qin, B. W. Yu // *Ferroelectr.* 2018. Vol. 524. P. 195–200. doi: 10.1080/00150193.2018.1432836.
9. Design and properties analysis of novel modified 1–3 piezoelectric composite / J. Wang, C. Zhong, S. H. Hao, L. K. Wang // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 1749. doi: 10.3390/ma14071749.
10. Wang H. W., Wang L. K., High frequency wide band underwater acoustic transducer for ring shaped composite material // *Acta Acustica*. 2017. Vol. 42, no. 1. P. 53–59. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2017.01.007.
11. Design of a broadband cavity baffle bender transducer / Z. Zhao, J. Wu, X. Qi, G. Qiao, W. Zhang, C. Zhang, K. Guo // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10, no. 5. P. 680. doi: 10.3390/jmse10050680.
12. Design, fabrication and testing of a high frequency broadband hydroacoustic transducer for sonar systems / M. Wu, L. Xia, H. Wang, T. Wei // *Results in Phys.* 2023. Vol. 52. P. 106872.
13. Smith W. A. The application of 1–3 piezocomposites in acoustic transducers // 1990 IEEE 7th Intern. Symp. Ferroelectr., Urbana-Champaign, IL, USA: IEEE, 1990. P. 145–152.
14. Study of effective properties of modified 1–3 piezocomposites / W. Li-kun, L. Li, Q. Lei, W. Weiwei, D. Tianxiao // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. P. 064120. doi: 10.1063/1.2975343.
15. SonoPanel 1–3 piezocomposite hydrophone-actuator panels / R. Gentilman, D. Fiore, W. Serwatka,

- H. Pham, B. Pazol, C. Near, L. Bowen // Proc. Conf. «Challenges of Our Changing Global Environment» (OCEANS '95 MTS/IEEE). San Diego, CA, USA: IEEE, 1995. doi: 10.1109/OCEANS.1995.528890.
16. Livneh S. S., Ting S. M., Safari A. Development of fine scale and large area piezoelectric ceramic fiber/polymer composites for transducer applications // *Ferroelectr.* 1994. Vol. 157. P. 421–426.
17. Stevenson J. W., Reidmeyer M. R., Huebner W. Fabrication and characterization of PZT/thermoplastic polymer composites for high-frequency phased linear arrays // *J. Am. Ceram. Soc.* 1994. Vol. 77, no. 9. P. 2481–2484.
18. Wan J. G., Tao B. Q. Design and study on a 1–3 anisotropy piezocomposite sensor // *Mater. Des.* 2000. Vol. 21, no. 6. P. 533–536.
19. UV laser micromachining of piezoelectric ceramic using a pulsed Nd:YAG laser / D. Zeng, K. Li, W. K. C. Yung, H. L. W. Chan, C. L. Choy, C. S. Xie // *Appl. Phys. A.* 2004. Vol. 78, no. 3. P. 415–421. doi: 10.1007/s00339-002-1956-9.
20. Partially stabilized zirconia-polymer composites fabricated with an ultrasonic cutter / Y. Ohara, M. Miyayama, K. Koumoto, H. Yanagida // *J. Mater. Sci. Lett.* 1993. Vol. 12. P. 1279–1282.
21. Benjamin K. C. Recent advances in 1–3 piezoelectric polymer composite transducer technology for AUV/UUV acoustic imaging applications // *J. Electroceram.* 2002. Vol. 8, no. 2. P. 145–154. doi: 10.1023/A:1020508130249.
22. McCollum M. D., Harmonic B. F., Wilson O. B. Transducers for sonics and ultrasonic (Proc. of the Third Intern. Workshop) // *J. Acoust. Soc. Am.* 1993. Vol. 94(1). P. 606. doi: 10.1121/1.407038.
23. Smith W. A., Shaulov A., Auld B. A. Tailoring the properties of composite piezoelectric materials for medical ultrasonic transducers // *IEEE Ultrasonics Symp.* San Francisco, CA, USA: IEEE, 1985. doi: 10.1109/ULTSYM.1985.198589.
24. Chan H. L. W., Unsworth J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1–3 composites used in ultrasonic transducer applications // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1989. Vol. 36, no. 4. P. 434–441. doi: 10.1109/58.31780.
25. Resonant modes of vibration in piezoelectric PZT-polymer composites with two dimensional periodicity / T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, B. A. Auld, Y. A. Shui, Y. Wang // *Ferroelectr.* 1984. Vol. 54(1). P. 183–186.
26. Wang C. Y., Wang C. Design of backing parameters for high-frequency broadband hydroacoustic transducer // *J. Harbin EngUniv.* 2022. Vol. 43. P. 1471–1477.
27. The parameters selection of matching layer of ultrasonic transducers / Jun Li, Feng Zhang, Xiping He, Yiman Zhu // *J. Shaanxi Normal Univ. (Natural Sc.Ed)* 2009. Vol. 37(5). P. 38–41.
28. Liu H. S., Mo X. P. Progress in research and design of broadband longitudinal transducers // *Tech. Acoust.* 2014. Vol. 33. P. 546–572.
29. Optimal design of an underwater piezocomposite ring transducer / Zh. Tian, Y. Roh, W. Kim, Ch. Joh // 2008 IEEE Ultrasonics Symp. Beijing, China: IEEE, 2008. P. 1405–1408. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0341.
30. Draheim M. R., Cao W. Finite element and experimental study of impedance matching layer optimization // *SPIE Proc. Ultrason. Transducer Eng.* 1997. Vol. 3037. P. 135–139. doi: 10.1117/12.271322.
31. Chen Y. C., Wu S. Multiple acoustical Matching layer design of ultrasonic transducer for medical application // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 41, no. 10. P. 6098–6107. doi: 10.1143/JJAP.41.6098.
32. Ultra-wideband underwater acoustic transducer with a gradient impedance matching layer / J. Bian, Y. Wang, Zh. Liu, M. Shen // *Appl. Acoustics.* 2021. Vol. 175, no. 6. P. 107789. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107789.
33. Howarth T. R., Ting R. Y. Electroacoustic evaluations of 1–3 piezocomposite sonopanel materials // *IEEE Trans. Ultras. Ferroelectrics and Frequency Control.* Vol. 47, no. 4. P. 886–894. doi: 10.1109/58.852071.
34. Zhang K. Broadband 1–3 piezocomposite transducers for underwater ultrasound // Proc. of the 2014 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Appl. Beijing, China: IEEE, 2014. P. 437–440. doi: 10.1109/SPAUDA.2014.6998618.
35. Elmash I. C., Koymen H. A wideband and wide-beamwidth acoustic transducer design for underwater acoustic communications // *OCEANS 2006–Asia Pacific.* Singapore: IEEE, 2007. P. 1–5. doi: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393856.
36. Aronov B. Coupled vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. Vol. 125, no. 2. P. 803–821. doi: 10.1121/1.3056560.
37. Zhang K., Lan Y., Li Q. Research on 1–3 piezocomposite broad-band underwater transducers // *Acta Acustica.* 2011. Vol. 36, no. 6. P. 631–637.
38. Lan Y, Zhang K. Research on 1-1-3 piezocomposite broad-band transducers // *J. of Harbin Engineer University.* 2011. Vol. 32, no. 11. P. 1479–1483. doi: 10.3969/j.issn.1006-7043.2011.11.015.
39. Design and fabrication of a high-frequency single-directional planar underwater ultrasound transducer / Q. G. Huang, H. W. Wang, S. H. Hao, C. Zhong, L. K. Wang // *Sensors* 2019. Vol. 19. P. 4336. doi: 10.3390/s19194336.
40. Cochran S., Parker M., Franch P. M. Ultra-broadband single crystal composite transducers for underwater ultrasound // *IEEE Ultrasonics Symp.* Netherlands: IEEE, 2005. P. 231–234. doi: 10.1109/ULTSYM.2005.1602838.
41. MSI Transducers. URL: <http://urlm.co/www.matsysinc.com> (дата обращения: 18.07.2018).
42. High frequency wide beam PVDF ultrasonic projector for underwater communications / M. S. Martins, C. Barardo, T. Matos, L. M. Gonçalves, J. Cabral, A. Silva, S. M. Jesus // *OCEANS 2017 – Aberdeen.* Aberdeen, UK: IEEE. doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084677.
43. Research and fabrication of high-frequency broadband and omnidirectional transmitting transducer / Sh. Hao, H. Wang, Ch. Zhong, L. Wang, H. Zhang // *Sensors.* 2018. Vol. 18, no. 7. P. 2347.
44. Bulter J. L. Model for ring transducer with inactive segments // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1976. Vol. 59, no. 2. P. 480–482. doi: 10.1121/1.380863.

45. Sherman C. H., Butler J. L. *Transducers and arrays for underwater sound. Modern acoustics and signal Proc. (MASP)*. New York: Springer, 2007. 265 p.

46. Miller H. B. Origin of the 33-driven ceramic ring-stack transducer // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1989. Vol. 86. P. 1602–1603. doi: 10.1121/1.398668.

47. Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer application. P. I: Resonant modes of vibration of

PZT rod polymer composites / T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, Y. J. Wang // *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.* 1985. Vol. SU-32, no. 4. P. 481–498. doi: 10.1109/t-su.1985.31623.

48. Xia L., Wang H., Huang Q. Design and fabrication of a stacked three-phase piezoelectric composites ring array underwater ultrasound transducer // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 5971. doi: 10.3390/ma14205971.

Информация об авторах

Мухсин 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@sfnedu.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@sfnedu.ru

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

References

1. Present and future piezocomposite technology in underwater sonar transducers / S. Cochran, P. Marin-Franch, D. Choi, M. P. Walsh, K. J. Kirk // *Proc. Institute of Acoustics*. 2005. Vol. 27(1). P. 1–13.

2. Wei T., Wang H., Su J. Design, analysis and testing of monometallic plate stepped broadband high sensitivity transducer // *J. of Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 57(7). P. 075102. doi: 10.1088/1361-6463/ad0bc3.

3. Zhang K. The study of high-frequency broad-band underwater transducers // 2012 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Appl. (SPAWDA). Shanghai, China: IEEE, 2012. P. 408–410. doi: 10.1109/SPAWDA.2012.6464120.

4. Study on the broadband piezoelectric ceramic transducer based on radial enhanced composite structure / G. Li, J. H. Gong, T. Wang, C. R. Qiu, Z. Xu // *Ceram. Intern.* 2018. Vol. 44, no. 1. P. S250–S253. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.101.

5. The ANSYS simulation of a new-type high frequency broadband acoustic transducer / C. Li, H. W. Wang, L. Qin, L. K. Wang // 6th Intern. Conf. Electr. Control. Eng. (ICECE2015) and 4th Intern. Conf. on Mat. Sci. and Manuf. (ICMSM2015). Shanghai, China: World Scientific, 2016. P. 412–418. doi: 10.1142/9789813100312_0058.

6. Research and fabrication of bimetallic plate transducer based on finite element analysis / Y. Lan, L. Xia, H. Wang, Z. Yu, Z. Shao, S. Jing // *Materials & Design*. 2024. Vol. 240. P. 112870. doi: 10.1016/j.matdes.2024.112870.

7. Smith W. A., Auld B. A. Modeling 1–3 composite piezoelectrics: thickness-mode oscillations // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.* 1991. Vol. 38, no. 1. P. 40–47. doi: 10.1109/58.67833.

8. Novel piezoelectric composite spherical cap broadband transducer / C. Zhong, L. K. Wang, L. Qin, B. W. Yu // *Ferroelectr.* 2018. Vol. 524. P. 195–200. doi: 10.1080/00150193.2018.1432836.

9. Design and properties analysis of novel modified 1–3 piezoelectric composite / J. Wang, C. Zhong, S. H. Hao, L. K. Wang // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 1749. doi: 10.3390/ma14071749.

10. Wang H. W., Wang L. K., High frequency wide band underwater acoustic transducer for ring shaped composite material // *Acta Acustica*. 2017. Vol. 42, no. 1. P. 53–59. doi: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2017.01.007.

11. Design of a broadband cavity baffle bender transducer / Z. Zhao, J. Wu, X. Qi, G. Qiao, W. Zhang, C. Zhang, K. Guo // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10, no. 5. P. 680. doi: 10.3390/jmse10050680.

12. Design, fabrication and testing of a high frequency broadband hydroacoustic transducer for sonar systems / M. Wu, L. Xia, H. Wang, T. Wei // *Results in Phys.* 2023. Vol. 52. P. 106872.

13. Smith W. A. The application of 1–3 piezocomposites in acoustic transducers // 1990 IEEE 7th Intern. Symp. Ferroelectr., Urbana-Champaign, IL, USA: IEEE, 1990. P. 145–152.

14. Study of effective properties of modified 1–3 piezocomposites / W. Li-kun, L. Li, Q. Lei, W. Weiwei, D. Tianxiao // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. P. 064120. doi: 10.1063/1.2975343.
15. SonoPanel 1–3 piezocomposite hydrophone-actuator panels / R. Gentilman, D. Fiore, W. Serwatka, H. Pham, B. Pazol, C. Near, L. Bowen // *Proc. Conf. «Challenges of Our Changing Global Environment» (OCEANS '95 MTS/IEEE)*. San Diego, CA, USA: IEEE, 1995. doi: 10.1109/OCEANS.1995.528890.
16. Livneh S. S., Ting S. M., Safari A. Development of fine scale and large area piezoelectric ceramic fiber/polymer composites for transducer applications // *Ferroelectr.* 1994. Vol. 157. P. 421–426.
17. Stevenson J. W., Reidmeyer M. R., Huebner W. Fabrication and characterization of PZT/thermoplastic polymer composites for high-frequency phased linear arrays // *J. Am. Ceram. Soc.* 1994. Vol. 77, no. 9. P. 2481–2484.
18. Wan J. G., Tao B. Q. Design and study on a 1–3 anisotropy piezocomposite sensor // *Mater. Des.* 2000. Vol. 21, no. 6. P. 533–536.
19. UV laser micromachining of piezoelectric ceramic using a pulsed Nd:YAG laser / D. Zeng, K. Li, W. K. C. Yung, H. L. W. Chan, C. L. Choy, C. S. Xie // *Appl. Phys. A*. 2004. Vol. 78, no. 3. P. 415–421. doi: 10.1007/s00339-002-1956-9.
20. Partially stabilized zirconia-polymer composites fabricated with an ultrasonic cutter / Y. Ohara, M. Miyayama, K. Koumoto, H. Yanagida // *J. Mater. Sci. Lett.* 1993. Vol. 12. P. 1279–1282.
21. Benjamin K. C. Recent advances in 1–3 piezoelectric polymer composite transducer technology for AUV/UUV acoustic imaging applications // *J. Electroceram.* 2002. Vol. 8, no. 2. P. 145–154. doi: 10.1023/A:1020508130249.
22. McCollum M. D., Harmonic B. F., Wilson O. B. Transducers for sonics and ultrasonic (Proc. of the Third Intern. Workshop) // *J. Acoust. Soc. Am.* 1993. Vol. 94(1). P. 606. doi: 10.1121/1.407038.
23. Smith W. A., Shaulov A., Auld B. A. Tailoring the properties of composite piezoelectric materials for medical ultrasonic transducers // *IEEE Ultrasonics Symp.* San Francisco, CA, USA: IEEE, 1985. doi: 10.1109/ULTSYM.1985.198589.
24. Chan H. L. W., Unsworth J. Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1–3 composites used in ultrasonic transducer applications // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1989. Vol. 36, no. 4. P. 434–441. doi: 10.1109/58.31780.
25. Resonant modes of vibration in piezoelectric PZT-polymer composites with two dimensional periodicity / T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, B. A. Auld, Y. A. Shui, Y. Wang // *Ferroelectr.* 1984. Vol. 54(1). P. 183–186.
26. Wang C. Y., Wang C. Design of backing parameters for high-frequency broadband hydroacoustic transducer // *J. Harbin EngUniv.* 2022. Vol. 43. P. 1471–1477.
27. The parameters selection of matching layer of ultrasonic transducers / Jun Li, Feng Zhang, Xiping He, Yiman Zhu // *J. Shaanxi Normal Univ. (Natural Sc.Ed)* 2009. Vol. 37(5). P. 38–41.
28. Liu H. S., Mo X. P. Progress in research and design of broadband longitudinal transducers // *Tech. Acoust.* 2014. Vol. 33. P. 546–572.
29. Optimal design of an underwater piezocomposite ring transducer / Zh. Tian, Y. Roh, W. Kim, Ch. Joh // *2008 IEEE Ultrasonics Symp.* Beijing, China: IEEE, 2008. P. 1405–1408. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0341.
30. Draheim M. R., Cao W. Finite element and experimental study of impedance matching layer optimization // *SPIE Proc. Ultrason. Transducer Eng.* 1997. Vol. 3037. P. 135–139. doi: 10.1117/12.271322.
31. Chen Y. C., Wu S. Multiple acoustical Matching layer design of ultrasonic transducer for medical application // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 41, no. 10. P. 6098–6107. doi: 10.1143/JJAP.41.6098.
32. Ultra-wideband underwater acoustic transducer with a gradient impedance matching layer / J. Bian, Y. Wang, Zh. Liu, M. Shen // *Appl. Acoustics.* 2021. Vol. 175, no. 6. P. 107789. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107789.
33. Howarth T. R., Ting R. Y. Electroacoustic evaluations of 1–3 piezocomposite sonopanel materials // *IEEE Trans. Ultras. Ferroelectrics and Frequency Control.* Vol. 47, no. 4. P. 886–894. doi: 10.1109/58.852071.
34. Zhang K. Broadband 1–3 piezocomposite transducers for underwater ultrasound // *Proc. of the 2014 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Appl.* Beijing, China: IEEE, 2014. P. 437–440. doi: 10.1109/SPAWDA.2014.6998618.
35. Elmash I. C., Koymen H. A wideband and wide-beamwidth acoustic transducer design for underwater acoustic communications // *OCEANS 2006–Asia Pacific*. Singapore: IEEE, 2007. P. 1–5. doi: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393856.
36. Aronov B. Coupled vibration analysis of the thin-walled cylindrical piezoelectric ceramic transducers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. Vol. 125, no. 2. P. 803–821. doi: 10.1121/1.3056560.
37. Zhang K., Lan Y., Li Q. Research on 1–3 piezocomposite broad-band underwater transducers // *Acta Acustica.* 2011. Vol. 36, no. 6. P. 631–637.
38. Lan Y, Zhang K. Research on 1-1-3 piezocomposite broad-band transducers // *J. of Harbin Engineer University.* 2011. Vol. 32, no. 11. P. 1479–1483. doi: 10.3969/j.issn.1006-7043.2011.11.015.
39. Design and fabrication of a high-frequency single-directional planar underwater ultrasound transducer / Q. G. Huang, H. W. Wang, S. H. Hao, C. Zhong, L. K. Wang // *Sensors* 2019. Vol. 19. P. 4336. doi: 10.3390/s19194336.
40. Cochran S., Parker M., Franch P. M. Ultra-broadband single crystal composite transducers for underwater ultrasound // *IEEE Ultrasonics Symp.* Netherlands: IEEE, 2005. P. 231–234. doi: 10.1109/ULTSYM.2005.1602838.
41. MSI Transducers. URL: <http://urlm.co/www.matsysinc.com> (дата обращения: 18.07.2018).
42. High frequency wide beam PVDF ultrasonic projector for underwater communications / M. S. Martins, C. Barardo, T. Matos, L. M. Gonçalves, J. Cabral, A. Silva, S. M. Jesus // *OCEANS 2017 – Aberdeen*. Aberdeen, UK: IEEE. doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084677.

43. Research and fabrication of high-frequency broadband and omnidirectional transmitting transducer / Sh. Hao, H. Wang, Ch. Zhong, L. Wang, H. Zhang // *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 7. P. 2347.

44. Bulter J. L. Model for ring transducer with inactive segments // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1976. Vol. 59, no. 2. P. 480–482. doi: 10.1121/1.380863.

45. Sherman C. H., Butler J. L. *Transducers and arrays for underwater sound. Modern acoustics and signal Proc. (MASP)*. New York: Springer, 2007. 265 p.

46. Miller H. B. Origin of the 33-driven ceramic ring-stack transducer // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1989. Vol. 86. P. 1602–1603. doi: 10.1121/1.398668.

47. Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer application. P. I: Resonant modes of vibration of PZT rod polymer composites / T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, Y. J. Wang // *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.* 1985. Vol. SU-32, no. 4. P. 481–498. doi: 10.1109/t-su.1985.31623.

48. Xia L., Wang H., Huang Q. Design and fabrication of a stacked three-phase piezoelectric composites ring array underwater ultrasound transducer // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 20. P. 5971. doi: 10.3390/ma14205971.

Information about the authors

Haider Kareem M. 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@sfedu.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@sfedu.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@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; принята к публикации после рецензирования 23.01.2025; опубликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 12.12.2024; accepted 23.01.2025; published online 28.03.2025.