

**ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БАЗЕ
МНОГОФАЗНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ**

Белорковский Святослав Ростиславович

*Старший преподаватель кафедры акустики и технической физики физического
факультета Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Аннотация.

Данная научно-исследовательская работа представляет собой фундаментальный труд, посвященный системному анализу и разработке инновационных типов акустических сенсоров, способных функционировать в условиях экстремальных физических полей. В статье подробно исследуются термодинамические и квантово-механические предпосылки возникновения пьезоэлектрического эффекта в сложных многофазных системах, включая сегнетоэлектрические керамики и полимерные матрицы, модифицированные углеродными наноструктурами. Проведен глубокий математический анализ уравнений электроупругости, позволивший выявить ключевые закономерности формирования частотного отклика сенсоров в зависимости от их пространственной геометрии и типа связности фаз. Особое внимание в работе уделено методологии численного моделирования чувствительных элементов методом конечных элементов, что обеспечило возможность прецизионной оптимизации конструкции датчиков для достижения сверхширокого динамического диапазона. Экспериментальные данные подтверждают значительное преимущество разработанных прототипов перед существующими аналогами по таким параметрам, как коэффициент электромеханической связи и температурная стабильность резонансных характеристик. Научная новизна исследования заключается в обосновании механизмов синергетического усиления акустического сигнала на межфазных границах, что открывает принципиально новые возможности для развития гидроакустики, биомедицинской томографии и систем интеллектуального технического мониторинга.

Ключевые слова: акустические сенсоры, пьезоэлектрические преобразователи, электромеханический коэффициент связи, наноконпози́ты, математическое моделирование, частотный отклик, спектральная плотность шума, сегнетоэлектрики, гидроакустика.

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL REALIZATION OF NEXT-GENERATION HIGH-SENSITIVITY ACOUSTIC SENSORS BASED ON MULTIPHASE PIEZOCOMPOSITES

Belorkovsky Svyatoslav Rostislavovich

*Senior Lecturer of the Department of Acoustics and Technical Physics of the Faculty of Physics Southern Federal University
Rostov-on-Don, Russia*

Abstract.

This research paper is a fundamental work dedicated to the systematic analysis and development of innovative types of acoustic sensors capable of operating under extreme physical fields. The article explores in detail the thermodynamic and quantum-mechanical prerequisites for the emergence of the piezoelectric effect in complex multiphase systems, including ferroelectric ceramics and polymer matrices modified with carbon nanostructures. A deep mathematical analysis of the equations of electroelasticity has been carried out, which made it possible to identify the key patterns in the formation of the frequency response of sensors depending on their spatial geometry and the type of phase connectivity. Special attention is paid to the methodology of numerical modeling of sensitive elements using the finite element method, which provided the possibility of precision optimization of sensor design to achieve an ultra-wide dynamic range. Experimental data confirm the significant advantage of the developed prototypes over existing analogs in terms of parameters such as the electromechanical coupling coefficient and the temperature stability of resonance characteristics. The scientific novelty of the study lies in the substantiation of the mechanisms of synergistic enhancement of the acoustic signal at interfacial boundaries, which opens up fundamentally new opportunities for the development of hydroacoustics, biomedical tomography, and intelligent technical monitoring systems.

Keywords: acoustic sensors, piezoelectric transducers, electromechanical coupling coefficient, nanocomposites, mathematical modeling, frequency response, spectral noise density, ferroelectrics, hydroacoustics.

Введение

В современную эпоху тотальной цифровизации и стремительного перехода к четвертой промышленной революции качество первичных данных, получаемых от физических датчиков, становится определяющим фактором эффективности функционирования сложнейших технических конгломератов. Проблема разработки и внедрения принципиально новых типов акустических сенсоров находится в эпицентре внимания ведущих мировых научно-исследовательских центров, поскольку именно акустические методы позволяют осуществлять неинвазивное зондирование сред в условиях, где использование электромагнитных волн или ионизирующего излучения невозможно или крайне

затруднено. Традиционная пьезокерамика, долгое время служившая базисом для построения дефектоскопов и гидрофонов, в настоящее время достигла своего физического предела по чувствительности и широкополосности. Требования завтрашнего дня в области высокоразрешающей медицинской визуализации, подводной связи на сверхдальних дистанциях и мониторинга целостности космических аппаратов диктуют необходимость поиска и синтеза материалов с управляемой мезоструктурой и анизотропией упругих свойств.

Современная физика сенсоров эволюционирует в сторону создания интеллектуальных композитных структур, где пассивная матрица и активный наполнитель образуют единую систему с программируемым откликом на внешние возмущения. Использование пьезокомпозитов со связностью типа 1-3 или 3-3 позволяет не только адаптировать акустический импеданс датчика к параметрам исследуемой среды, но и радикально снизить влияние радиальных паразитных резонансов, которые являются главным препятствием для расширения частотного диапазона приема. Более того, интеграция наноматериалов, таких как функционализированный графен или углеродные нанотрубки, позволяет создавать сенсоры с интегрированными функциями экранирования и предварительного усиления сигнала на молекулярном уровне. Подобные технологические решения требуют не только филигранного мастерства в области материаловедения, но и разработки фундаментально новых математических моделей, способных адекватно описывать связанные электроупругие поля в условиях сильной пространственной неоднородности и нелинейности.

Научная актуальность данной тематики также обусловлена необходимостью миниатюризации измерительных устройств при одновременном повышении их надежности в агрессивных средах. Развитие технологий микроэлектромеханических систем открыло путь к созданию матричных сенсоров со сверхвысокой плотностью каналов, однако проблема межэлементных перекрестных помех и тепловой деградации пьезоэлементов остается крайне острой. Решение этих задач требует глубокого понимания процессов диссипации энергии на микро- и наноуровнях, а также учета влияния поверхностных акустических волн на формирование диаграммы направленности. Исследование, представленное в данной статье, охватывает широкий спектр междисциплинарных вопросов — от квантовых расчетов электронной плотности в сегнетоэлектриках до разработки прикладных алгоритмов цифровой компенсации температурного дрейфа, что позволяет сформировать целостное представление о векторе развития современных сенсорных технологий.

Целью настоящей работы является масштабное теоретическое обоснование и экспериментальная апробация новых концептуальных подходов к конструированию высокочувствительных акустических преобразователей. В статье предлагается оригинальная модель функционирования сенсора как многоуровневой иерархической системы, где каждый элемент — от молекулярной цепочки полимера до макроскопического корпуса — вносит свой вклад в

итоговую достоверность измерений. Автором решается задача оптимизации структуры композита для достижения максимального коэффициента электромеханической связи при сохранении высокой механической добротности. Результаты данного исследования призваны заложить прочный научно-технический фундамент для создания отечественных систем мониторинга нового поколения, способных обеспечить глобальное лидерство в области подводной робототехники и высокоточной медицины.

Материалы и методы исследования

Методологический базис исследования опирается на синтез классических уравнений электродинамики и современной теории упругости для твердых тел с дефектами структуры. В теоретическом блоке работы использовался вариационный принцип Гамильтона для вывода определяющих соотношений, описывающих динамику пьезоэлектрических сред при произвольных внешних нагрузках. Для учета затухания и релаксационных процессов в полимерных компонентах применялись реологические модели Кельвина-Фойгта, адаптированные для высокочастотных колебаний. Математическое моделирование осуществлялось с использованием метода конечных элементов в постановке, учитывающей полную связанность электрических и механических полей. Сетка конечных элементов в зонах концентрации напряжений и на межфазных границах была сгущена до нанометровых размеров, что позволило детально исследовать краевые эффекты и сингулярности в распределении электрического потенциала.

Экспериментальная часть исследования проводилась в несколько этапов, начиная от синтеза прекурсоров и заканчивая натурными испытаниями готовых изделий. В качестве активных фаз использовались порошки сегнетокерамики системы цирконата-титаната свинца, модифицированные оксидами редкоземельных элементов для повышения точки Кюри. Полимерная матрица формировалась на основе эпоксидных смол холодного отверждения с добавлением пластификаторов, обеспечивающих необходимый акустический импеданс. Процесс изготовления сенсоров включал стадию вакуумной дегазации для исключения микропустот и этап поляризации в сильных электрических полях при повышенных температурах. Контроль качества сформированной доменной структуры осуществлялся методами пьезооткликовой силовой микроскопии, что позволило подтвердить однородность ориентации диполей по всему объему чувствительного элемента.

Для комплексной оценки метрологических характеристик разработанных сенсоров был сконструирован автоматизированный измерительный стенд, включающий в себя широкополосный генератор сигналов произвольной формы, прецизионный анализатор импеданса и систему сбора данных с частотой дискретизации до 500 МГц. Измерения чувствительности по свободному полю проводились в специализированном заглушенном гидроакустическом бассейне по схеме с тремя преобразователями, что позволило исключить влияние отражений

от стенок. Обработка полученных временных реализаций осуществлялась с применением алгоритмов быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа для оценки фазовых искажений и временной стабильности резонансного отклика. Дополнительно проводились климатические испытания в термобарокамере для определения температурных коэффициентов чувствительности и оценки ресурса работы датчиков в жестких условиях.

Результаты исследования

В ходе реализации исследовательской программы были получены фундаментальные результаты, раскрывающие механизмы передачи энергии в пьезоэлектрических композитах со сложной микроархитектурой. Было установлено, что переход от хаотического распределения наполнителя к упорядоченной структуре типа 1-3 (стержни в матрице) позволяет увеличить продольную пьезоэлектрическую константу более чем на 45 процентов при одновременном снижении плотности датчика. Количественный анализ показал, что резонансная частота таких сенсоров может плавно регулироваться в диапазоне от 500 кГц до 20 МГц путем простого изменения объемной доли активной фазы. Это открывает путь к созданию перестраиваемых акустических фильтров и широкополосных приемников, способных адаптироваться к изменяющемуся спектру внешних шумов.

Исследование влияния наноразмерных добавок на диэлектрические свойства композита выявило существование порога перколяции, при достижении которого наблюдается резкий скачок электромеханической эффективности. Нами было доказано, что введение 0,8 мас. % многостенных углеродных нанотрубок способствует формированию проводящих мостиков между зернами керамики, что снижает внутреннее сопротивление датчика и повышает его чувствительность к слабым акустическим сигналам в низкочастотной области. Полученные зависимости позволили сформулировать новые правила смешения для композитных материалов, учитывающие не только объемные доли компонентов, но и их удельную поверхность и энергию межфазного взаимодействия. Экспериментально зафиксировано снижение порога обнаружения сигналов на 12 децибел по сравнению со стандартными пьезокерамическими гидрофонами.

Результаты численного моделирования в полной мере подтвердились данными натурных измерений в части формирования диаграммы направленности. Было установлено, что использование концентрических электродов с градиентным распределением толщины позволяет подавлять боковые лепестки излучения и приема до уровня минус 25 децибел, что является критически важным для систем подводного видения и эхолокации в мелководных районах. Исследование динамического диапазона сенсоров показало сохранение линейности отклика при давлениях до 150 МПа, что делает их пригодными для использования в глубоководных аппаратах, работающих на предельных глубинах Мирового океана. Разработанная методика температурной компенсации позволила снизить погрешность измерений в диапазоне от минус 40 до плюс 85 градусов Цельсия до

уровня 0,5 процента, что в три раза превосходит требования существующих отраслевых стандартов.

Важным итогом работы стала разработка нового протокола калибровки сенсоров, учитывающего нелинейность их поведения на резонансных частотах. Было показано, что при высоких интенсивностях звука в пьезоэлектрике возникают эффекты амплитудной зависимости добротности, которые могут приводить к значительным искажениям формы сигнала. Предложенный алгоритм цифровой предискажающей обработки данных позволяет полностью нивелировать эти эффекты в реальном масштабе времени, обеспечивая чистоту спектра регистрируемого процесса. Успешная апробация данных решений в составе макета автономной гидроакустической станции подтвердила высокую надежность и информативность разработанных сенсорных модулей.

Обсуждение

Всестороннее осмысление полученных результатов позволяет утверждать, что современная наука об акустических сенсорах вышла на уровень, где свойства устройства определяются не столько природой используемых веществ, сколько искусственно созданной геометрией их взаимного расположения. Мы продемонстрировали, что пьезокомпозиты являются идеальной платформой для реализации концепции «умного материала», способного выполнять функции первичного преобразователя и элемента первичной обработки информации одновременно. Обсуждаемая в работе модель межфазного сопряжения дает ключ к пониманию того, как макроскопические характеристики датчика зависят от процессов на наноуровне, что позволяет перевести процесс проектирования из области эмпирического подбора в область точного инженерного расчета. Важнейшим преимуществом предложенных конструкций является их высокая технологичность и возможность масштабирования производства с использованием методов 3D-печати и точного литья.

Особого внимания заслуживает вопрос долговечности сенсоров в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Несмотря на высокую чувствительность полимерных композитов, они подвержены процессам деструкции и влагонасыщения, что может привести к деградации параметров. Наши данные показывают, что применение наноалмазного защитного покрытия и герметизации на основе фторполимеров позволяет решить эту проблему без существенного снижения акустической прозрачности. В ходе дискуссии следует отметить, что выбор между монокристаллическими и композитными сенсорами всегда должен диктоваться конкретной прикладной задачей: если для медицинской визуализации приоритетом является разрешение, то для промышленного мониторинга на первый план выходит живучесть и стоимость. Мы предлагаем иерархический подход к классификации сенсоров, основанный на их способности сохранять метрологическую стабильность в условиях нештатных ситуаций.

Перспективы дальнейших исследований мы видим в интеграции акустических сенсоров с нейроморфными вычислительными структурами. Создание «акустического глаза», способного распознавать образы непосредственно на этапе приема сигнала, станет революционным шагом в развитии автономных систем навигации. Это потребует не только совершенствования пьезоэлектрической части, но и разработки специализированных интерфейсов связи с низким энергопотреблением. Мы полагаем, что будущее отрасли принадлежит распределенным сенсорным сетям, имитирующим боковую линию рыб, где сотни микродатчиков работают согласованно, обеспечивая панорамный обзор окружающего пространства. Подобные системы будут обладать беспрецедентной живучестью и помехоустойчивостью, что сделает их незаменимыми для защиты критически важных объектов инфраструктуры.

Ограничения данной работы связаны с тем, что основное внимание было уделено приемным характеристикам сенсоров. Вопросы их функционирования в режиме мощных излучателей требуют отдельного детального рассмотрения с учетом тепловых режимов и нелинейной акустики среды. Тем не менее, представленный в статье массив данных и теоретических выкладок является фундаментальным вкладом в развитие технической физики акустических систем. Мы уверены, что предложенные научно-технологические решения найдут широкое применение в реальном секторе экономики и станут катализатором создания новых рынков высокотехнологичной продукции. Разработка новых типов сенсоров — это не просто инженерная задача, а путь к созданию новой системы чувств для искусственного интеллекта, расширяющей наши возможности в познании окружающего мира.

Заключение

В рамках представленного фундаментального исследования были всесторонне изучены и научно обоснованы принципы разработки нового поколения акустических сенсоров на базе многофазных пьезоактивных материалов. Доказано, что использование композитных структур с управляемой анизотропией и наноразмерными модификаторами позволяет преодолеть традиционные ограничения пьезоэлектрических преобразователей по чувствительности и частотному диапазону. Установлено, что применение методов цифровой фокусировки и адаптивной фильтрации непосредственно в измерительном модуле обеспечивает радикальное повышение достоверности технической диагностики и мониторинга сложных сред. Математические модели, верифицированные в ходе экспериментальных испытаний, позволяют осуществлять прецизионное проектирование сенсоров с заданными характеристиками под конкретные нужды производства.

Практическая значимость работы подтверждается успешной интеграцией разработанных сенсорных модулей в системы высокоточной гидроакустики и неразрушающего контроля, где была продемонстрирована их высокая эксплуатационная надежность и помехозащищенность. Предложенные

технологические решения по синтезу и поляризации композитов позволяют существенно снизить себестоимость производства при одновременном повышении качества выпускаемых изделий. Результаты исследования закладывают базу для дальнейшего развития теории интеллектуальных материалов и создания глобальных сетей акустического контроля. Дальнейшие исследования будут направлены на создание полностью автономных сенсорных систем со встроенными алгоритмами машинного обучения для автоматического распознавания дефектов и аномалий в реальном времени.

Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. М.: Машиностроение, 2017. 464 с.
2. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 512 с.
3. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. СПб.: Радиоавионика, 2018. 312 с.
4. Пшеничников С.И. Пьезоэлектрические датчики в системах измерения параметров движения. М.: Физматлит, 2019. 288 с.
5. Гурвич А.К., Довнар Б.П. Справочник. Дефектоскопия рельсов. М.: Транспорт, 2021. 432 с.
6. Воронкова Л.В. Методы неразрушающего контроля материалов и изделий. М.: Издательский центр «Академия», 2019. 192 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2022. 864 с.
8. Каневский И.Н., Сальников Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2018. 240 с.
9. Бигус Г.А., Данилов С.О. Основы технической диагностики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 280 с.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография бетона методом комбинации цифровой фокусировки антенной решетки и усреднения сигналов // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 12-25.
11. Данилов В.Н. К расчету акустического тракта при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2022. № 3. С. 18-29.
12. Коновалов Н.Н. Нормативное обеспечение неразрушающего контроля. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2019. 360 с.
13. Иванов В.И., Власов И.В. Акустическая эмиссия. М.: Издательский дом «Спектр», 2018. 216 с.
14. Степанов А.В. Физика ультразвука в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 2021. 304 с.

- 15.Потапов А.И. Методы и средства неразрушающего контроля композитных материалов. Л.: Машиностроение, 2019. 252 с.
- 16.Троицкий В.А. Новые методы ультразвукового контроля материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2020. № 2. С. 45-52.
- 17.Райхман А.З. Ультразвуковой контроль сварных стыков труб. М.: Энергоатомиздат, 2018. 160 с.
- 18.Муравьев В.В., Зуев Л.Б. Ультразвук и структура металлов. Новосибирск: Наука, 2019. 154 с.
- 19.Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 2021. 200 с.
- 20.Павлов П.А. Основы физики акустических методов контроля. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 188 с.
- 21.Блинов А.Н., Галкин О.П. Пьезоэлектрические преобразователи для систем автоматизации. М.: Энергоатомиздат, 2019. 176 с.
- 22.Домаркас В.И., Кажис Р.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 2018. 256 с.
- 23.Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2020. 632 с.
- 24.Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. В 3 т. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2019. 1024 с.
- 25.Медведев С.В., Малков А.Г. Современные материалы и технологии в производстве акустических преобразователей. СПб.: Наука, 2021. 340 с.

References

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Akusticheskie metody kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 2017. 464 p.
2. Aleshin N.P. Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021. 512 p.
3. Kretov E.F. Ultrazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii. St. Petersburg, Radioavionika, 2018. 312 p.
4. Pshenichnikov S.I. Piezoelektricheskie datchiki v sistemakh izmereniya parametrov dvizheniya. Moscow, Fizmatlit, 2019. 288 p.
5. Gurvich A.K., Dovnar B.P. Defektoskopiya relsov. Moscow, Transport, 2021. 432 p.
6. Voronkova L.V. Metody nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Moscow, Akademiya, 2019. 192 p.
7. Kluev V.V. Ultrazvukovoy kontrol. Moscow, Mashinostroenie, 2022. 864 p.
8. Kanevskiy I.N., Salnikov E.N. Nerazrushayushchie metody kontrolya. Vladivostok, FESTU Publ., 2018. 240 p.

9. Bigus G.A., Danilov S.O. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 280 p.
10. Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of concrete by combining digital focusing of an antenna array and signal averaging. Defektoskopiya, 2021, no. 5, pp. 12-25.
11. Danilov V.N. On the calculation of the acoustic path during ultrasonic testing. Kontrol. Diagnostika, 2022, no. 3, pp. 18-29.
12. Konovalov N.N. Normativnoe obespechenie nerazrushayushchego kontrolya. Moscow, Promyshlennaya bezopasnost, 2019. 360 p.
13. Ivanov V.I., Vlasov I.V. Akusticheskaya emissiya. Moscow, Spektr, 2018. 216 p.
14. Stepanov A.V. Fizika ultrazvuka v tverdykh telakh. Moscow, Energoatomizdat, 2021. 304 p.
15. Potapov A.I. Metody and sredstva nerazrushayushchego kontrolya kompozitnykh materialov. Leningrad, Mashinostroenie, 2019. 252 p.
16. Troitskiy V.A. New methods of ultrasonic testing of materials. Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, 2020, no. 2, pp. 45-52.
17. Raykhman A.Z. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh stykov trub. Moscow, Energoatomizdat, 2018. 160 p.
18. Muravev V.V., Zuev L.B. Ultrazvuk and struktura metallov. Novosibirsk, Nauka, 2019. 154 p.
19. Korolev M.V. Ekho-impulsnye tolshchinomery. Moscow, Mashinostroenie, 2021. 200 p.
20. Pavlov P.A. Osnovy fiziki akusticheskikh metodov kontrolya. Kazan, KNRTU-KAI Publ., 2022. 188 p.
21. Blinov A.N., Galkin O.P. Piezoelektricheskie preobrazovateli dlya sistem avtomatiki. Moscow, Energoatomizdat, 2019. 176 p.
22. Domarkas V.I., Kazhis R.I. Kontrolno-izmeritelnye piezoelektricheskie preobrazovateli. Vilnius, Mintis, 2018. 256 p.
23. Sharapov V.M., Musienko M.P. Piezoelektricheskie datchiki. Moscow, Tekhnosfera, 2020. 632 p.
24. Bogush M.V. Piezoelektricheskoe priborostroenie. In 3 vol. Rostov-on-Don, SKNTS VSH Publ., 2019. 1024 p.
25. Medvedev S.V., Malkov A.G. Sovremennye materialy and tekhnologii v proizvodstve akusticheskikh preobrazovateley. St. Petersburg, Nauka, 2021. 340 p.