

*На правах рукописи*



Шевцова Мария Сергеевна

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ  
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВ НА  
ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2014

Работа выполнена в Южном научном центре Российской академии наук (ЮНЦ РАН).

Научный руководитель:

**Наседкин Андрей Викторович**

доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», кафедра «Математическое моделирование», заведующий кафедрой

Официальные оппоненты:

**Гайджуров Петр Павлович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», кафедра технической механики, профессор

**Глушков Евгений Викторович**

доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», Институт математики, механики и информатики, гл. научн. сотрудник

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита диссертации состоится «18» сентября 2014 г. в 16 час. 20 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.208.22 при Южном федеральном университете по адресу: 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Д-406.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ и на сайте <http://hub.sfedu.ru/diss/announcement/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.208.22,  
доктор технических наук, профессор



А.Н. Целых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** разработки математических моделей, численных методов и программных средств для численного анализа пористых пьезокомпозиционных материалов определяется перспективностью их использования при создании высокоэффективных акустических пьезопреобразователей — гидрофонов и излучателей, а также при синтезе новых структур и составов композитных пьезокерамик с целью предсказания их свойств, определяемых конечным потребителем. Наблюдающийся в последние годы повышенный интерес исследователей к пористым пьезоэлектрическим материалам обусловлен тем, что эти материалы обладают высокой пьезочувствительностью, расширенной полосой эффективно излучаемых звуковых частот, меньшим по сравнению с плотной керамикой акустическим импедансом, и обеспечивают лучшее согласование с акустической средой, позволяя создавать более эффективные конструкции подводных акустических устройств. К настоящему времени для многих пористых пьезокерамик рядом экспериментаторов установлено, что такие важнейшие толщинные характеристики, как пьезомодуль  $d_{33}$  и коэффициенты электромеханической связи  $k_t$  и  $k_{33}$ , практически не зависят от пористости, а соответствующие продольные величины  $d_{31}$ ,  $k_p$ ,  $k_{31}$ , жесткостные свойства и диэлектрические проницаемости быстро убывают с ростом пористости.

Моделирование пьезокомпозиционных материалов и в частности, пористых пьезокомпозиционных материалов, проводилось ранее в работах многих ученых (П.В. Лещенко, Б.П. Маслов, А.В. Наседкин, Ю.В. Соколкин, А.Н. Соловьев, А.А. Паньков, В.Ю. Тополов, Л.Н. Хорошун, Н. Banno, С.Р. Bowen, Н. Dunn, I. Getman, Н. Kara, F. Levassort, R. Ramesh, E.C.N. Silva, M. Taya, A. Perry, W. Wersing, и др.). Имеется и достаточно большой набор данных экспериментов, выполненных С.С. Лопатиным, Т.Г. Лупейко, А.Н. Рыбьянцом, А.Г. Сегала, Е.И. Ситало, К. Boumchedda, R. Guo, B. Jadidian, J.F. Li, E. Roncari, С.Н. Sherman, L. Shuyu, A. Winde, T. Zeng, H.L. Zhang, и др.

Однако противоречивость имеющихся экспериментальных данных и отсутствие прецизионных методов моделирования пористых пьезокомпозиционных материалов, учитывающих их многообразные свойства и микроструктуру, не позволяют полностью реализовать на практике преимущества этого нового класса активных материалов. В результате и задачи расчета и оптимизации пьезоэлектрических устройств с элементами из пористых пьезокомпозиционных материалов оказываются исследованными не в полной мере.

Перечисленные проблемы обусловили выбор **темы диссертационного исследования**, связанной с разработкой методов компьютерного моделирования эффективных свойств пористых пьезокомпозиционных материалов, которые включают определение полного набора эффективных электромеханических

констант для представительных объемов материалов различной связности и их дальнейшее применение к макрообъему гомогенизированного сплошного материала. Такая техника позволяет на макроуровне исключить из рассмотрения особенности внутренней структуры и поляризации композитного пьезоматериала, тем самым, многократно сократить число степеней свободы и обеспечить возможности параметрической оптимизации конструкций пьезопреобразователей на основе пористой пьезокерамики.

**Цель работы** была сформулирована следующим образом: **разработка методов генерации структур** пористых пьезокомпозиционных материалов различной связности, конечно-элементных (КЭ) методов и программных средств их моделирования с целью определения полного набора эффективных модулей, оптимизации конструктивных параметров многослойных подводных акустических преобразователей, эффективно функционирующих в широком диапазоне частот.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

**В области математического моделирования:**

- Разработаны модели гомогенизации композитного пьезоэлектрического материала в представительном объеме на основе метода эффективных модулей; сформулированы краевые задачи электроупругости с различными граничными условиями, обеспечивающими постоянство некоторых величин электромеханических полей для однородной среды, позволяющие определить полный набор эффективных модулей пьезокомпозиционных материалов различной степени пористости и сегнетожесткости (стр. 36-50).
- Предложены модели процесса поляризации пористого пьезокерамического материала с учетом неоднородности поля вектора поляризации в окрестности пор, позволяющие дать уточненное описание его поведения на уровне макрообъемов (стр. 32-36).
- Предложены перколяционные модели представительных объемов двухфазных композитов, поддерживающие кластерную структуру материала одной из фаз, и обеспечивающие высокую степень соответствия с рядом экспериментально исследованных структур пористых пьезокерамических материалов (стр. 51-56).
- Разработаны модели работающих во внешней акустической среде многослойных пьезоизлучателей с элементами из пористой пьезокерамики и определены параметры их эффективности (стр. 91-96, 113-122).

**В области численных методов:**

- Разработаны численные методы генерации представительных объемов в форме кубических элементных решеток применительно к двухфазным пьезокомпозициям, позволяющие генерировать пористые структуры различной связности без нарушения сплошности одной из фаз (стр. 115-118).
- Разработаны КЭ методы моделирования неоднородности поля поляризации в кубической элементной решетке пористого пьезокерамического материала, позволяющие дать более точное описание

микроструктуры неоднородности пористых пьезоэлектрических материалов (стр. 32-35).

- Предложены КЭ подходы к решению задачи многокритериальной оптимизации многослойного широкодиапазонного акустического излучателя с активным элементом из пористого пьезокомпозита, позволяющие проектировать более эффективные гидроизлучатели (стр. 115-118).

#### **В области разработки программных комплексов:**

- Создан программный комплекс, позволяющий генерировать представительные объемы и определять в рамках метода конечных элементов (МКЭ) полный набор эффективных материальных констант пористых пьезокерамических композитов различной связности с возможностями учета неоднородности поля поляризации вблизи пор (стр. 134-140). Созданные программы верифицированы в результате вычислительных экспериментов по расчету комплекса эффективных материальных констант пористых пьезокерамических материалов различной связности и сегнетожесткости и сравнения с известными данными (стр. 64-90).

- Разработаны программы для исследования многослойных гидроакустических пьезопреобразователей, предназначенные для решения задач многокритериальной оптимизации многослойного широкодиапазонного акустического излучателя с активным элементом из пористой пьезокерамики (стр. 140-154).

**Методы исследования.** При определении эффективных модулей пористых пьезокерамических материалов моделирование представительных объемов двухфазного пористого пьезокомпозита выполнялось с использованием простого случайного метода и метода ОДА (ограниченная диффузией агрегация) Виттена-Сандера, уравнений пьезоэлектричества, учитывающих неоднородность поляризации в окрестности пор и программных средств APDL ANSYS.

Формулировка и численное решение связанной задачи акустики и электроупругости в осесимметричной постановке для восстановления амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) эффективности излучателя по току TCR (Transmitting Current Response) и уровня акустического давления в дальнем поле SPL (Sound Pressure Level) выполнялось программными средствами КЭ пакета Comsol Multiphysics.

Численное решение связанной задачи многокритериальной оптимизации конструкции излучателя по основным функциональным показателям (целевым функционалам) включало построение множества Парето и его сечений, позволяющих восстановить топологию зоны оптимума варьируемых параметров конструкции – акустических импедансов подложки, согласующего и защитного слоев, пористости пьезоактивного слоя.

**Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследования подтверждается** корректным использованием основных положений механики деформируемого твердого тела, пьезоэлектричества, механики композитов, акустики, прикладной математики, включая методы моделирования случайных процессов, численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, методы многокритериальной оптимизации, возможностями современных средств конечно-элементного моделирования, а также тщательным сопоставлением результатов расчетов с данными экспериментов, полученными на самом современном исследовательском оборудовании по методикам, принятым в мировом исследовательском сообществе.

**Научную новизну** разработанных моделей, методов их численной и программной реализации составляют следующие **результаты, выносимые на защиту:**

— полученные математические формулировки и численные решения задач электроупругости для определения полного набора эффективных модулей пространственно неоднородных пьезоэлектрических сред при главных и естественных граничных условиях (с. 45-54);

— предложенные и реализованные методы генерации представительных объемов двухфазного кубического пьезокомпозита позволили создавать пористые структуры различной связности кластерного типа (с. 55-59);

— выполненное на элементном уровне модельное описание неоднородности векторного поля поляризации в структуре пористой керамики обеспечило повышение точности определения ее электромеханических свойств и большую согласованность с характеристиками реальной пористой керамики (с. 36-39);

— разработанный комплекс программ позволил осуществить единую методологию моделирования пористых пьезокерамических материалов на основе метода эффективных модулей, учета микроструктуры, неоднородности поля поляризации и МКЭ (с. 126-133);

— полученная в результате комплекса численных экспериментов группа эмпирических полиномиальных зависимостей полного набора материальных констант пьезоэлектрических материалов от пористости обеспечила возможность синтеза структуры пористых керамик с требуемыми характеристиками (с. 67-93);

— разработанные КЭ модели многослойных пьезоэлектрических излучателей продемонстрировали эффективность использования активных элементов из пористой пьезокерамики при возбуждении акустических полей как в нестационарных режимах, так и в режимах установившихся колебаний (с. 94-98, 115-117);

— предложенные и реализованные методы многокритериальной оптимизации КЭ модели многослойных пьезоэлектрических излучателей позволили дать

рекомендации по повышению эффективности их важнейших рабочих характеристик (с. 117-124).

**Практическая ценность работы** состоит в создании и реализации эффективного и универсального инструмента, позволяющего разработчикам пьезоактивных материалов прогнозировать электромеханические свойства создаваемых пористых керамик, и обеспечивающего возможность построения методов численной оптимизации характеристик пьезоэлектрических устройств за счет резкого сокращения числа степеней свободы оптимизируемой конструкции. Реализованный на основе КЭ моделей пространственно неоднородных пьезоэлектрических тел подход к решению задач многокритериальной оптимизации конструкций акустических излучателей с пористым пьезоактивным элементом позволяет целенаправленно выбирать материалы для элементов его конструкции, а также формировать массивы акустических излучателей с заданной полосой приема/излучения и диаграммой направленности.

**Реализация результатов работы.** Полученные в диссертации научные и прикладные результаты нашли применение в научно-исследовательских разработках кафедры математического моделирования факультета математики, механики и компьютерных наук, НИИ механики и прикладной математики Южного федерального университета, а также Комплексного отдела механики, физики и нанотехнологий Южного научного центра РАН в рамках грантов РФФИ 10-08-13300-РТ\_оми, 11-01-09284-моб\_з, 12-01-00829-а, 12-01-09256-а, 12-08-31350-мол\_а (выполнен под руководством автора), 13-01-00943- а, 13-08-00794- а, 14-08-31612-мол\_а, НИР Минобрнауки, ЮФУ и НИР по заказу ОАО «МВЗ им. М.Л.Миля».

**Апробация работы.** Разработанные методы и полученные результаты проходили апробацию на следующих научных конференциях: «Advanced Problems in Mechanics — APM 2010» (Санкт-Петербург, 2010); «ASME Biennial Conference on Engineering Systems, Design and Analysis – ESDA, 2010» (Стамбул, Турция – 2010); «X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики» (Н.Новгород, 2011); «The 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics» (Афины, Греция, 2011); «VII Росс. научн.-техн. конф. Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2012); «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (Дивноморское, 2012-2014); «Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications — PHENMA 2012, 2013, 2014» (Ростов-на-Дону – 2012; Гаосюн, Тайвань — 2013; Кхон Каен, Таиланд— 2014); «8<sup>th</sup> European Solid Mechanics Conference – ESMC 2012» (Грац, Австрия, 2102); «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского

хозяйства» (Ростов-на-Дону, 2012, 2013); «International Congress on Computational Mechanics and Simulation» (Hyderabad, India, 2012); «IV International Conference on Integrity - Reliability - Failure – IRF’2013» (Фуншал, Португалия, 2013); «Second China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications CRCNAA 2013» (Ростов-на-Дону, 2013); «2013 Conference on Computational Mechanics — CCM 2013» (Санья, Китай, 2013); «OCEANS’14 MTS/IEEE Conference» (Тайбей, Тайвань, 2014).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликована **31** работа, в том числе, три статьи в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденного ВАК РФ, 6 работ – в зарубежных трудах конференций и коллективных монографиях, включенных в системы цитирования Web of Science, Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 128 наименований, приложение, 59 рисунков и 8 таблиц. Общий объем работы составляет 174 страницы машинописного текста.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дан анализ состояния исследований по изучаемой проблематике, обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены и обоснованы их научная новизна и практическая значимость, приведены данные об апробации работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу существующих методов моделирования пористых пьезокомпозиционных материалов, описанию постановок задач электроупругости и их конечно-элементных аппроксимаций, методики расчета поля неоднородной поляризации пористой пьезокерамики, теории метода эффективных модулей для определения полного набора эффективных характеристик пористых пьезоэлектрических композитов с учетом неоднородности поля поляризации и используемых методов генерации представительных объемов двухфазных композитов.

**Раздел 1.1** посвящен обзору методов моделирования пористых пьезокомпозиционных материалов, описаны отличительные особенности предлагаемого в диссертационном исследовании подхода.

В **разделе 1.2** представлена краткая классификация наиболее востребованных в настоящее время пьезокомпозиционных материалов. Приведены данные, подтверждающие преимущества пористых материалов, используемых в ультразвуковых преобразователях, гидрофонных конструкциях, датчиках давления и других пьезоэлектрических устройствах.

В разделе 1.3 представлены классическая и обобщенная постановки задач электроупругости; описан общий подход, используемый для нахождения приближенных решений задачи электроупругости в пространственно неоднородных средах с использованием МКЭ.

Раздел 1.4 посвящен определению поля неоднородной поляризации в неоднородном представительном объеме пьезокерамического материала в форме куба, равномерно разбитого на кубические конечные элементы (КЭ).

На первом этапе генерируется представительный объем — куб  $\Omega = [0, L] \times [0, L] \times [0, L]$  с геометрически одинаковыми кубическими ячейками, каждая из которых — КЭ со своими диэлектрическими свойствами, и ребрами, ориентированными вдоль осей декартовой системы координат  $Ox_1x_2x_3$ . В области  $\Omega$  решается краевая задача квазиэлектростатики относительно функции электрического потенциала  $\varphi$ :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (1)$$

$$\varphi = V_j, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_{\varphi j}, \quad j = 1, 2; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q, \quad (2)$$

где  $\mathbf{D}$  — вектор электрической индукции;  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля;  $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x})$  — тензор диэлектрических проницаемостей неполяризованной керамики с порами;  $L$  — линейный размер куба;  $\Gamma = \partial\Omega = \bigcup_j \Gamma_{\varphi j} \cup \Gamma_q$ ;  $\Gamma_{\varphi j}$  ( $j = 1, 2$ ) — электроды  $x_3 = 0$  и  $x_3 = L$ , для которых задается разность потенциалов  $V_1 - V_2$ . По результатам конечно-элементного решения задачи квазиэлектростатики (1), (2) находились значения векторов поляризации  $\mathbf{P}^{ek} = \mathbf{D}^{ek} - \varepsilon_0 \mathbf{E}^{ek}$  в центральной точке каждого КЭ с номером  $k$ , не являющегося порой, где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума. С каждым КЭ ассоциировались свои элементные системы координат  $Ox_1^{ek}x_2^{ek}x_3^{ek}$ , для которых направления осей  $Ox_3^{ek}$  совпадали с направлениями векторов поляризации  $\mathbf{P}^{ek}$ . Другие оси определялись двумя поворотами: относительно оси  $Ox_3$  в плоскости  $Ox_1x_2$  на угол  $\theta_{12}^{ek}$ , и поворотом промежуточной системы координат  $O\tilde{x}_1^{ek}\tilde{x}_2^{ek}x_3$  относительно оси  $O\tilde{x}_2^{ek}$  в плоскости  $Ox_3\tilde{x}_1^{ek}$  на угол  $\theta_{31}^{ek}$ , как показано на рисунке 1.

На втором этапе моделирования КЭ электростатики модифицируются в элементы с пьезоэлектрическими свойствами. Новым элементам присваиваются материальные свойства: поляризованной пьезокерамики — для КЭ матрицы, и пренебрежимо малые упругие и пьезоэлектрические модули и диэлектрические проницаемости вакуума — для пор. В результате каждый КЭ поляризованной пористой пьезокерамики будет иметь свои

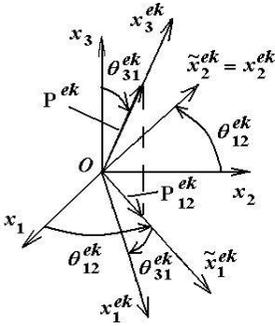


Рисунок 1 — Локальная система координат отдельного КЭ

матрицы  $\mathbf{c}^{Eek}$ ,  $\mathbf{e}^{ek}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{Sek}$  упругих жесткостей, пьезомодулей и диэлектрических проницаемостей, соответственно, которые получаются по известным формулам пересчета тензорных коэффициентов при переходе от декартовой системы координат  $Ox_1x_2x_3$ , порождаемой исходной трансверсальной изотропией пьезокерамики, в элементные системы координат  $Ox_1^{ek}x_2^{ek}x_3^{ek}$ .

В *разделе 1.5* формулируется группа задач для численного определения полного набора материальных констант пористой пьезокерамики по методу эффективных модулей.

Сущность использованного в работе метода эффективных модулей состоит в следующем. Для представительного объема  $\Omega$  пространственно неоднородного пьезокерамического материала кристаллографического класса *6mm* рассматривается краевая задача, включающая систему уравнений

$$\mathbf{L}^*(\nabla) \cdot \mathbf{T} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \cdot \mathbf{S} - \mathbf{e}^* \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{L}(\nabla) \cdot \mathbf{u}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (5)$$

$$\mathbf{L}^*(\nabla) = \begin{bmatrix} \partial_1 & 0 & 0 & 0 & \partial_3 & \partial_2 \\ 0 & \partial_2 & 0 & \partial_3 & 0 & \partial_1 \\ 0 & 0 & \partial_3 & \partial_2 & \partial_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \nabla = \begin{Bmatrix} \partial_1 \\ \partial_2 \\ \partial_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

где на границе  $\Gamma = \partial \Omega$  заданы поля смещений  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$  и потенциала  $\varphi = \varphi(\mathbf{x})$

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}^*(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{S}_0, \quad \varphi = -\mathbf{x} \cdot \mathbf{E}_0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma = \partial \Omega, \quad (7)$$

причем компоненты шестимерного вектора  $\mathbf{S}_0$  и трехмерного вектора  $\mathbf{E}_0$  не зависят от координат  $\mathbf{x} \in \Gamma$ , а свойства материала являются функциями пространственных координат  $\mathbf{x}$ :  $\mathbf{c}^E = \mathbf{c}^E(\mathbf{x})$  —  $6 \times 6$  матрица упругих жесткостей, измеренных при постоянном электрическом поле;  $\mathbf{e} = \mathbf{e}(\mathbf{x})$  —  $3 \times 6$  матрица пьезомодулей;  $\boldsymbol{\varepsilon}^S = \boldsymbol{\varepsilon}^S(\mathbf{x})$  —  $3 \times 3$  матрица диэлектрических проницаемостей, измеренных при постоянных деформациях. Здесь  $\mathbf{T} = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}\}$  — (псевдо-) вектор напряжений  $\sigma_{ij}$ ;  $\mathbf{S} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{23}, 2\varepsilon_{13}, 2\varepsilon_{12}\}$  — (псевдо-) вектор деформаций  $\varepsilon_{ij}$ ; (...) — операция транспонирования.

Неоднородной пьезокерамической среде ставится в соответствие среда сравнения – макрооднородный пьезоэлектрический материал с некоторыми неизвестными пока модулями  $\mathbf{c}^{E\text{eff}}$ ,  $\mathbf{e}^{\text{eff}}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{S\text{eff}}$ . Для их определения учитывается, что для геометрически тождественного объема среды сравнения при тех же граничных условиях, решение задачи, аналогичной (3) – (7), но с постоянными модулями  $\mathbf{c}^{E\text{eff}}$ ,  $\mathbf{e}^{\text{eff}}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{S\text{eff}}$ , приводит к равным значениям средних деформаций  $\langle \mathbf{S} \rangle = \langle \mathbf{S}_0 \rangle$  и напряженностей электрического поля  $\langle \mathbf{E} \rangle = \langle \mathbf{E}_0 \rangle$ , и принимается, что равны и средние значения напряжений  $\langle \mathbf{T} \rangle = \langle \mathbf{T}_0 \rangle$  и электрических индукций  $\langle \mathbf{D} \rangle = \langle \mathbf{D}_0 \rangle$ , где величины, относящиеся к среде сравнения помечены нижним индексом «0», а операция осреднения по объему понимается в смысле  $\langle \dots \rangle = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} (\dots) d\Omega$ .

Отметим, что важным обоснованием метода эффективных модулей является справедливость энергетических соотношений

$$\langle \mathbf{S}^* \cdot \mathbf{T} \rangle = \langle \mathbf{S}^* \rangle \cdot \langle \mathbf{T} \rangle = \mathbf{S}_0^* \cdot \langle \mathbf{T} \rangle, \quad \langle \mathbf{E}^* \cdot \mathbf{D} \rangle = \langle \mathbf{E}^* \rangle \cdot \langle \mathbf{D} \rangle = \mathbf{E}_0^* \cdot \langle \mathbf{D} \rangle \quad (8)$$

Далее для системы (3)–(6) формулируются пять краевых задач (9)–(13), различающихся тем, одна из компонент  $S_{0\alpha}$ ,  $E_{0i}$  ( $\alpha = 1, \dots, 6$ ;  $i = 1, 2, 3$ ) в граничных условиях (7) отлична от нуля:

$$\text{I. } S_1 = \varepsilon_0, \quad S_\beta = 0, \quad \beta \neq 1, \quad \mathbf{E}_0 = \mathbf{0} \Rightarrow$$

$$c_{1j}^{E\text{eff}} = \langle \sigma_{jj} \rangle / \varepsilon_0, \quad j = 1, 2, 3, \quad e_{31}^{\text{eff}} = \langle D_3 \rangle / \varepsilon_0 \quad (9)$$

$$\text{II. } S_3 = \varepsilon_0, \quad S_\beta = 0, \quad \beta \neq 3, \quad \mathbf{E}_0 = \mathbf{0} \Rightarrow$$

$$c_{33}^{E\text{eff}} = \langle \sigma_{33} \rangle / \varepsilon_0, \quad e_{33}^{\text{eff}} = \langle D_3 \rangle / \varepsilon_0, \quad c_{13}^{E\text{eff}} = \langle \sigma_{11} \rangle / \varepsilon_0 = \langle \sigma_{22} \rangle / \varepsilon_0 \quad (10)$$

$$\text{III. } S_4 = 2\varepsilon_0, \quad S_\beta = 0, \quad \beta \neq 4, \quad \mathbf{E}_0 = \mathbf{0} \Rightarrow$$

$$c_{44}^{E\text{eff}} = \langle \sigma_{23} \rangle / (2\varepsilon_0), \quad e_{15}^{\text{eff}} = \langle D_2 \rangle / (2\varepsilon_0) \quad (11)$$

$$\text{IV. } \mathbf{S}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_1 \Rightarrow e_{15}^{\text{eff}} = -\langle \sigma_{13} \rangle / E_0, \quad \varepsilon_{11}^{S\text{eff}} = \langle D_1 \rangle / E_0 \quad (12)$$

$$\text{V. } \mathbf{S}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_3 \Rightarrow$$

$$e_{31}^{\text{eff}} = -\langle \sigma_{11} \rangle / E_0 = -\langle \sigma_{22} \rangle / E_0, \quad e_{33}^{\text{eff}} = -\langle \sigma_{33} \rangle / E_0, \quad \varepsilon_{33}^{S\text{eff}} = \langle D_3 \rangle / E_0, \quad (13)$$

где  $\mathbf{e}_i$  — орты системы координат,  $i = 1, 2, 3$ .

Как несложно заметить, решение задач I-V в совокупности позволяет найти полный набор эффективных констант пьезокерамического композита ( $c_{11}^{E\text{eff}}$ ,  $c_{12}^{E\text{eff}}$ ,  $c_{13}^{E\text{eff}}$ ,  $c_{33}^{E\text{eff}}$ ,  $c_{44}^{E\text{eff}}$ ,  $e_{31}^{\text{eff}}$ ,  $e_{33}^{\text{eff}}$ ,  $e_{15}^{\text{eff}}$ ,  $\varepsilon_{11}^{S\text{eff}}$ ,  $\varepsilon_{33}^{S\text{eff}}$ ).

Аналогично описанному выше подходу, в *разделе 1.5* сформулированы и другие типы краевых задач электроупругости с заменой главных граничных условий на естественные граничные условия, которые также позволяют определить полный набор эффективных констант пьезоэлектрических композитов.

В *разделе 1.6* приведены разработанные алгоритмы случайного метода, метода начальной концентрации, и метода ОДА Виттена-Сандера генерации представительных объемов, позволяющих получить структуры двухфазного кубического пьезокомпозита, описывающие возможные типы пористости. В основе перечисленных способов лежат методы Монте-Карло и теории перколяции. Выделена положительная особенность метода ОДА, заключающаяся в том, что он позволяет получить связный каркас для одной из фаз композита. Однако реализация предложенного метода генерации композита требует существенных временных затрат. На рисунке 2 представлены сечения кубических представительных объемов, состоящих из 20x20x20 элементов и сгенерированных с помощью перечисленных методов при 30% пористости.

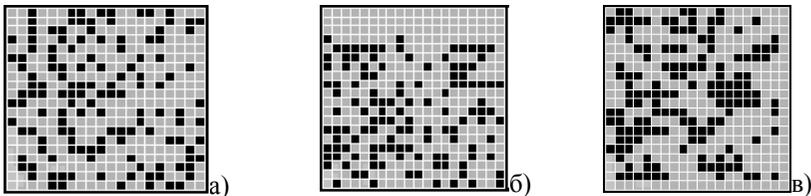


Рисунок 2 — Сечения представительных объемов, сгенерированных простым случайным методом (а), методом начальной концентрации б) и ОДА (в) при 30 % пористости;  
серым цветом помечен материал, черным — поры

Программная реализация КЭ решения задач (3)-(7) с краевыми условиями (9)-(13) была выполнена в виде единого программного модуля «PorousPiezoMat» на языке APDL ANSYS, импортирующего результаты генерации представительного объема пористой структуры размером  $N \times N \times N$  с  $N$  кубическими КЭ по каждой оси. При этом представительные объемы создавались автономным программным модулем «CubeGen». Подробное описание программных модулей дано в Главе 4.

**Во второй главе** представлены результаты расчетов эффективных модулей пьезокомпозиционных материалов различной связности и сегнетожесткости; выполнено построение, анализ и сравнение зависимостей полученных характеристик от значения пористости с известными

экспериментальными данными, и на основе этого сравнения выполнены расчеты материальных констант пьезокерамик, экспериментальные данные для которых до настоящего времени не получены.

В *разделе 2.1* на основе анализа существующих экспериментальных данных отмечается, что приводимые зависимости по влиянию пористости на материальные константы пьезокерамики не охватывают их полный набор, что вызвано сложностью выполнения соответствующих экспериментов. В связи с этим, в разделе выполнен отбор наиболее надежных зависимостей для последующего сравнения с результатами расчетов.

В *разделе 2.2* приведены результаты численных экспериментов по определению материальных констант для пьезокерамик различной сегнетожесткости, структура которых сгенерирована простым случайным и ОДА методами, тогда как *раздел 2.3* посвящен сравнительному анализу и обсуждению результатов расчетов с экспериментальными данными, где также выводятся модельные соотношения для зависимостей материальных констант широкого класса пьезокерамик от пористости.

В *разделе 2.4*, где представлены результаты численных экспериментов по расчету полного набора эффективных констант для материалов различной связности, сегнетожесткости и степени пористости, показано, что для большинства эффективных констант лучшее согласование с имеющимися экспериментальными данными получено при использовании представительных объемов пористого пьезокерамического материала, построенных по методу ОДА, и сделаны выводы о необходимости учета неоднородности поля поляризации в пористом материале. На рисунке 3 приведены некоторые из полученных зависимостей относительных продольного и поперечного пьезомодулей и численные и экспериментальные данные, полученные ранее. Сравнение кривых, приведенных на рисунке 3, подтверждает выводы, сделанные ранее.

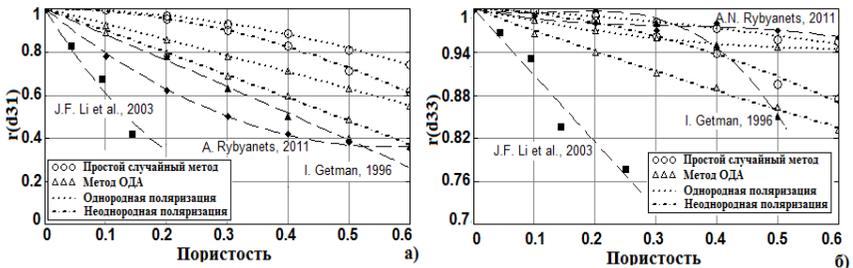


Рисунок 3 — Сравнение зависимостей относительных пьезомодулей  $r(d_{31})$  (а) и  $r(d_{33})$  (б) от пористости для материала средней сегнетожесткости с известными экспериментальными данными

В *разделе 2.5* приведено решение по МКЭ одномерной нестационарной задачи по моделированию многослойного акустического излучателя с пористым пьезоактивным слоем, размещенного в жидкой среде. Полученные зависимости звукового давления от пористости продемонстрировали возможность значительного улучшения характеристик излучателя путем управляемого изменения пористости пьезоактивного слоя для лучшего согласования акустических импедансов, даже при уменьшении количества согласующих слоев. Эти результаты обосновали возможность постановки задачи многокритериальной оптимизации характеристик излучателя с учетом ограничений на свойства материалов слоев.

**Третья глава** посвящена постановке и решению задачи оптимизации многослойного гидроакустического излучателя на основе пористой пьезокерамики с использованием полученных во второй главе функциональных зависимостей эффективных материальных констант от пористости.

В *разделах 3.1-3.3* кратко рассмотрены подходы к моделированию гидроакустических преобразователей, описаны наиболее распространенные конструкции, а также проанализированы критерии выбора материалов для многослойных пьезоизлучателей. В *разделе 3.4* сформулирована связанная задача акустики и электроупругости для погруженного в воду многослойного пьезоэлектрического преобразователя, осесимметричная модель которого



Рисунок 4 — Схема многослойного преобразователя в акустической среде: 1 – акустическое окно, 2 – согласующий слой, 3 – активный слой из пористой пьезокерамики, 4 – подложка, 5 – защитный слой

реализована в КЭ пакете COMSOL Multiphysics в рамках совместно работающих модулей пьезоэлектричества и акустики (уравнение Гельмгольца)

представлена на рисунке 4; боковая и нижняя поверхности излучателя покрыты защитным слоем. На внешней границе акустической среды помещен идеальный поглощающий слой (PML), моделирующий неотражающее граничное условие. Толщины составляющих слоев брались равными половине длины продольной волны толщиной моды колебаний для пьезоэлектрического слоя, подложки и защитного слоя; а толщина слоя акустического окна —  $\frac{3}{4}$ , и согласующего слоя —  $\frac{1}{4}$  длины волны на частоте 300кГц.

Связанная задача акустики и электроупругости была

реализована в КЭ пакете COMSOL Multiphysics в рамках совместно работающих модулей пьезоэлектричества и акустики (уравнение

$$\Delta p + \frac{\omega^2}{c_s^2} p = 0 \quad (16)$$

где  $p = p(\mathbf{x}, \omega)$  — акустическое давление,  $\omega = 2\pi f$  (рад/с) — угловая частота,  $f$  (Гц) частота колебаний,  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воды,  $c_s = 1500$  м/с — скорость звука в воде.

Возбуждение акустической среды в диапазоне от 100 до 400 кГц, включающем первую частоту толщинных мод колебаний, производилось путем задания ускорения в направлении  $z$  интерфейсной внешней поверхности акустического окна. Аналогично задавались граничные условия на боковой поверхности преобразователя, в радиальном направлении. На левой границе задавалось граничное условие осевой симметрии; а акустическая среда и PML считались находящимися в условиях идеального контакта. Нижняя граница преобразователя была жестко закреплена. На верхнюю границу активного слоя воздействовал гармонический электрический потенциал амплитудой 100В; а его нижняя граница была заземлена.

**В разделе 3.5** представлена постановка задачи оптимизации многослойного пьезоэлектрического преобразователя.

В качестве материала подложки был принят вольфрам вследствие его высокой механической жесткости и повышенного акустического импеданса. Механические свойства акустического окна и согласующего слоя, а также, пористость активного пьезокерамического слоя были выбраны в качестве варьируемых параметров для получения:

— максимального уровня звукового давления в прямом луче (Sound Pressure Level или SPL) на расстоянии 1 метр от источника звука

$$SPL = 20 \lg \left( \frac{\langle p \rangle}{p_{ref}} \right), \quad \langle p \rangle = \frac{1}{\Delta f_{12}} \int_{f_1}^{f_2} p(f) df \quad (18)$$

где  $p$  — звуковое давление в точке измерения (measurement point),  $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  Па — пороговое значение звукового давления,  $\Delta f_{12} = f_2 - f_1$ .

— максимального коэффициента передачи по току (Transmitting Current Response или TCR)

$$\langle TCR \rangle = \frac{1}{\Delta f_{12}} \int_{f_1}^{f_2} \frac{p(f)}{I(f)} df, \quad (19)$$

где  $I(f)$  — амплитуда электрического тока, протекающего через активный элемент при постоянной амплитуде действующего потенциала;

—минимальной неравномерности звукового давления в исследуемом диапазоне частот 100...400 кГц

$$\langle \Delta p \rangle = \sqrt{\frac{1}{\Delta f_{12}} \int_{f_1}^{f_2} |\langle p \rangle - p(f)|^2 df} \quad (20)$$

Рассматриваемая задача формулируется как задача многокритериальной оптимизации, когда одновременно оптимизируются целевые функционалы (18)–(20), и, следовательно, существует не единственное оптимальное решение, а некоторое множество допустимых решений, в данном случае, в трехмерном пространстве. Задача оптимизации в этом случае может быть записана в виде

$$\min_{x \in X} (\Phi_1(x), \dots, \Phi_p(x)). \quad (21)$$

Эффективным подходом к ее решению является построение множества и фронта Парето, который и был использован в работе.

Пространство варьируемых параметров конструкции излучателя было принято 7-мерным; а координатами точки (варианта конструкции) в  $\mathcal{R}^7$  были выбраны следующими: модули Юнга  $E$ , коэффициенты Пуассона  $\nu$ , плотности  $\rho$  согласующего слоя и акустического окна и пористость пьезоактивного слоя. Диапазоны изменения этих параметров выбирались, исходя из справочных данных о характеристиках водопоглощения и акустического импеданса; пористость была ограничена значением 0.5.

В процессе оптимизации программным модулем MATLAB производилось изменение параметров дизайна преобразователя; для каждого набора параметров — вызов КЭ модели Comsol Multiphysics, возвращающей частотные характеристики SPL и TCR; и вычисление целевых функционалов (18)–(20). Реконструкция и графическая иллюстрация диаграмм Парето выполнялась посредством вспомогательных процедур, реализованных в программах MATLAB.

В *разделе 3.6* представлены численные результаты решения задачи оптимизации многослойного пьезоэлектрического преобразователя. Особенностью подхода Парето является задание приемлемых значений целевых функционалов, которые формируют фронт Парето. Допустимые значения рассматриваемых функционалов принимались удовлетворяющими следующим неравенствам:

$$\langle p \rangle \geq 150 \text{ дБ}, \quad \langle \Delta p \rangle \leq 2 \text{ дБ}, \quad \langle TCR \rangle \geq 1400 \text{ дБ/А}. \quad (22)$$

В качестве материала активного слоя использовалась пьезокерамика PZT-4, где зависимости эффективных модулей от пористости подчинялись модельным соотношениям, полученным во второй главе.

В предварительном цикле численных экспериментов было установлено, что зависимость целевых функционалов от перечисленных выше варьируемых параметров конструкции не имеет ярко выраженного характера и достаточной чувствительности. В связи с этим в качестве «вспомогательных» параметров конструкции были введены акустические импедансы слоев, которые должны подчиняться известным из практики условиям согласования. Расчет величин импедансов производился по известной формуле  $Z = \rho c$ , где  $c = \sqrt{E(1-\nu)/[\rho(1+\nu)(1-2\nu)]}$  — скорость распространения продольной акустической волны в изотропной среде. Импеданс активного слоя определяется величиной пористости, от которой зависят плотность и элемент матрицы упругих модулей  $c_{33}^E(p)$ . Выражения для импедансов интегрируют в себе величины  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ , уменьшая размерность пространства варьируемых факторов до трех. Таким образом, найденные области допустимых значений импедансов позволяют выбрать необходимый материал слоя, варьируя значения  $E$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  с учетом различных ограничений.

Для получения наглядного представления о структуре множества Парето в виде наложенных линий уровней каждого из функционалов, множество Парето проектировалось на подпространства пар параметров дизайна с последующим сглаживанием линий уровня. Приведенные на рисунке 5 проекции на подпространства пористости и импеданса согласующего слоя (а), импедансов акустического окна и согласующего слоя (б) изображают область оптимальных значений (темные области) и фронт Парето (светлые области).

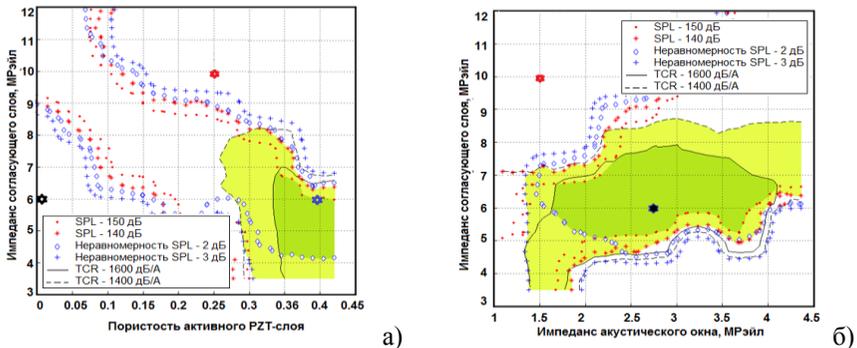


Рисунок 5 — Проекция множества Парето, представленные контурными линиями уровней целевых функционалов

Разработанные в диссертационном исследовании подходы, методы и программный инструментарий были также использованы при решении практической задачи оптимизации конструкции многослойного пьезоэлектрического гидрофона с перфорированными наноразмерными мембранами, представленной в *разделе 3.7*.

**В четвертой главе** представлено краткое описание разработанных численных методов и программного комплекса, включающего три основные программы и ряд вспомогательных, используемых для удобства постпроцессорной обработки и визуализации результатов численных экспериментов. Программа «CubeGen», написанная на языке C, выполняет построение моделей бинарных композитов на основе простого случайного метода, метода начальной концентрации и метода ОДА, с возможностью последующего экспорта полученных структур в программный комплекс ANSYS.

Программа «PorousPiezoMat», написанная на макроязыке APDL ANSYS, выполняет импорт структуры представительного объема пористого пьезокомпозита, решает задачу квазиэлектростатики для импортированного объема с целью моделирования неоднородной поляризации композита; решает 5 статических задач электроупругости со специальными граничными условиями, и в результате постпроцессорной обработки находит полный набор эффективных модулей пористого пьезокомпозита.

Программа решения осесимметричной связанной задачи пьезоэлектричества и акустики с варьируемыми параметрами дизайна и модуль постпроцессинга результатов ее работы написаны скриптами MATLAB-Comsol.

**В заключении** изложены основные выводы и результаты диссертационного исследования.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующие:

1. Разработана программа для генерации представительных объемов двухфазного кубического пьезокомпозита различного типа связности, с использованием простого случайного метода, метода начальной концентрации и метода ограниченной диффузией агрегации (ОДА) Виттена-Сандера.

2. На основе метода эффективных модулей для пространственно неоднородных электроупругих структур сформулированы пять типов вспомогательных задач, позволивших в результате их численного решения получить полный набор эффективных модулей пьезоэлектрической среды.

3. Модели процесса поляризации керамики с учетом ее пористой структуры и неоднородности поля вектора поляризации программно реализованы на языке APDL в системе ANSYS, что позволило учесть

особенности анизотропии упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических модулей пористого пьезокерамического материала в каждом конечном элементе представительного объема.

4. Выполнен цикл численных экспериментов по построению зависимостей материальных констант пористых пьезоэлектрических материалов различной сегнетожесткости от величины пористости, изменяющейся от нуля (плотная керамика) до 0,6 (высокопористый материал). Учет типа связности путем использования различных методов генерации представительных объемов и неоднородности поля вектора поляризации впервые позволил получить группу эмпирических зависимостей полного набора материальных констант пьезоэлектрических материалов от пористости в виде полиномов.

5. Сравнительный анализ построенных эмпирических зависимостей материальных констант пьезоэлектрических материалов от пористости с экспериментальными данными, полученными ведущими специалистами в области создания пьезокомпозиционных материалов, показал, что учет неоднородности поляризации в окрестности пор обеспечивает лучшее согласование полученных модельных эмпирических зависимостей с данными экспериментов. Показано, что для большинства эффективных констант наименьшая погрешность получена при использовании представительных объемов пористого пьезокерамического материала, построенных по методу ОДА Виттена-Сандера.

6. Сформулирована и решена задача многокритериальной оптимизации чувствительности подводного пьезоизлучателя, где оптимизируемыми параметрами приняты пористость, зависящий от нее акустический импеданс пьезоактивного слоя, импедансы акустического окна и согласующего слоев, а в качестве целевых функционалов выбраны уровень звукового давления (SPL), коэффициент акустического преобразования по току (TCR) и среднеквадратичное отклонение уровня звукового давления в заданном частотном диапазоне. Предложенная формулировка задачи существенно использовала определенные зависимости пьезоконстант от пористости, позволившие понизить число варьируемых степеней свободы оптимизируемой конструкции и обеспечила учет ограничений на свойства материалов элементов конструкции излучателя.

В результате диссертационного исследования создан мощный универсальный инструмент для разработчиков новых пьезоактивных материалов, позволяющий прогнозировать свойства создаваемых керамик с заданными типом связности и пористости, а также обеспечивающий эффективную оптимизацию характеристик пьезоэлектрических преобразователей и их массивов за счет существенного сокращения числа степеней свободы оптимизируемой конструкции и возможности учета эксплуатационных, конструкторских и технологических ограничений.

### Основные публикации по теме диссертации

#### *Публикации в российских изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Шевцова, М.С. Моделирование эффективных модулей для различных типов пористых пьезокерамических материалов / А.В. Наседкин, М.С. Шевцова // Вестник ДГТУ. – 2013. – №3–4 (72–73). – С. 16–26.
2. Шевцова, М.С. Сравнительный анализ результатов моделирования пористой пьезокерамики методами эффективных модулей и конечных элементов с экспериментальными данными / А.В. Наседкин, М.С. Шевцова // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2013. – № 2. – 9 с. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1615>.
3. Шевцова, М.С. Сравнительный анализ методов оптимизации топологии (SIMP и Level Set) на примере реконструкции крыла стрекозы / В.С. Шевцова, М.С. Шевцова // Вестник Южного научного центра. – 2013. – Т.9, №1. – С. 8-16.

#### *Публикации в изданиях, представленных в базах данных Web of Science и/или Scopus*

4. Shevtsova, M. An optimal parameters determination for ferroelectric's polarization model / A. Scaliukh, A. Soloviev, E. Dmitrieva, M. Shevtsova // Proceedings of the 10<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems, Design and Analysis, ESDA2010. – Istanbul, Turkey, 2010. – Vol. 2. – P. 263–269
5. Shevtsova, M. Improved finite element approaches for modeling of porous piezocomposite materials with different connectivity / A.V. Nasedkin, M.S. Shevtsova // Ferroelectrics and superconductors: Properties and applications. – New-York: Nova Science Publishers, 2011. – Ch.7. – P.231–254.
6. Shevtsova, M.S. Finite-element based comparative investigation of sandwich design and membrane-type PZT hydrophones with perforated damping back-plate for underwater applications / M.S. Shevtsova, I.V. Zhilyaev // Piezoelectrics & Related Materials: Investigations & Applications. – New-York: Nova Science Publishers, 2012. – P. 79–113.
7. Shevtsova, M.S. Multiscale computer simulation of piezoelectric devices with elements from porous piezoceramics / A.V. Nasedkin., M.S. Shevtsova // Physics and mechanics of new materials and their applications. – New-York: Nova Science Publishers, 2013. – Ch. 16. – P. 185–202.
8. Shevtsova, M.S. The fabrication of hydrophone based on epitaxial PZT film for acoustic device applications / Y.-T. Cheng, M.S. Shevtsova, I.V. Zhilyaev // Physics and mechanics of new materials and their applications. – New-York: Nova Science Publishers, 2013. – P. 373–381.
9. Shevtsova, M.S. Optimal design of underwater acoustic projector with active elements made from porous piezoceramics / A.V. Nasedkin, M.S. Shevtsova, S.-H. Chang // Advanced Materials: Springer Proceedings in Physics. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2014. – Vol. 152, Ch. 20. – P. 249–260.

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

10. Шевцова М.С. «PorousPiezoMat». Свидетельство № 2013661800. Дата приоритета 16.12.2013.
11. Ремизов В.В., Шевцова М.С. «CubeGen». Свидетельство № 2013662310. Дата приоритета 25.02.2014.

*Публикации в других изданиях*

12. Шевцова, М.С. Конечно-элементное моделирование пьезокомпозитных материалов различной связности / А.В. Наседкин, М.С. Шевцова // Тр. IX Межд. научно-технич. конф. «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства» «ИнЭРТ-2010». – г. Ростов-на-Дону, 2010. – С. 244–248.
13. Shevtsova, M.S. Finite element modeling of porous piezocomposite materials with different connectivity and applications for analysis of ultrasonic transducers / T.V. Domashenkina, A.V. Nasedkin, V.V. Remizov, M.S. Shevtsova // Proceedings of the 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics. – Athens, Greece, 2011. – 14 p.
14. Шевцова, М.С. Моделирование чувствительности гидрофона с учетом нелинейности, вызванной большими гидростатическими давлениями / И.В. Жилиев, М.С. Шевцова // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники*. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2011. – №14. – С.13–22.
15. Шевцова, М.С. Конечно-элементное моделирование и оптимизация импульсного излучателя из пористой пьезокерамики различной сегнетожесткости / М.С. Шевцова // *Материалы 2-й научно-практической школы-семинара молодых ученых*, 18–21 декабря. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2012. – С. 138–143.
16. Шевцова, М.С. Конечно-элементный дизайн ультразвуковых пьезопреобразователей из пористой керамики для медицинских применений / А.В. Наседкин, М.С. Шевцова // *Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии (ИнЭРТ-2012): Тр. X Межд. научно-технич. форума*. – Ростов-на-Дону: ИЦ ДГТУ, 2012. – С.192–195.
17. Shevtsova, M.S. Simulation of composite materials by the methods of effective modules and finite elements / A.A. Nasedkina, A.V. Nasedkin, V.V. Remizov, M.S. Shevtsova // Proc. IV Int. Congr. Comput. Mechanics and Simulation (ICCMS 2012), 9–12 Dec. – Hyderabad, India, 2012. – CD. Paper 417. – 8 p.
18. Shevtsova, M.S. Finite-element determination of the effective properties for porous piezocomposite materials with different connectivity / A.V. Nasedkin, M.S. Shevtsova // *Proceedings of the Second China–Russia Conference «Numerical Algebra with Applications»*, June 25–29. – Rostov-on-Don, 2013. – P. 108–110.

19. Shevtsova, M.S. Multiobjective optimal design of underwater acoustic projector with porous piezocomposite active elements / A.V. Nasedkin, M.S. Shevtsova, J.-C. Liu // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 2013. – Vol.1, № 6. – P. 89–94.
20. Shevtsova, M.S. Some approaches for determination of effective properties for active multiphase composites / A.V. Nasedkin, A.A. Nasedkina, V.V. Remizov, M.S. Shevtsova // Proc. IRF'2013, IV Int. Conf. Integrity - Reliability – Failure, 23-27 June. – Funchal, Eds. J.F. Silva Gomes, S.A. Meguid. Univ. Porto – Univ. Toronto, Univ. Madeira. INEGI, 2013. – CD. Paper 4069. – 9 p.
21. Shevtsova, M.S. Multiobjective optimization of an underwater acoustic projector with porous piezocomposite active element / A.V. Nasedkin, M.S. Shevtsova, S.-H. Chang // Proceedings of the OCEANS'14 MTS/IEEE Conference, April 7–10. – Taipei, Taiwan, 2014. – 6 p.

**Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве.** В работе [4] разработаны численные методы идентификации характеристик пьезоэлектрических и композиционных материалов по данным экспериментов; в работе [5] на макроязыке APDL ANSYS реализована процедура для численного определения полного набора эффективных характеристик пористого пьезокомпозиционного материала; в [1, 13, 17-18, 20] выполнен расчет полного набора эффективных модулей для пьезокомпозиционных материалов различной связности и сегнетожесткости; в [2] проведен сравнительный анализ численных результатов по определению эффективных характеристик пьезоматериалов с имеющимися экспериментальными данными; в работе [3] выполнен сравнительный анализ методов оптимизации механических систем с большим числом степеней свободы; в [6, 8, 14] предложена и проанализирована при различных граничных условиях упрощенная КЭ-модель гидрофона с перфорированным пьезоактивным слоем и выполнен анализ чувствительности гидрофона с учетом нелинейности поведения пьезоматериала активного слоя; в [7] построены эмпирические зависимости полного набора эффективных констант пьезокомпозиционных материалов различной сегнетожесткости от параметра пористости; проведен сравнительный анализ рабочих характеристик многослойного излучателя с активным слоем из плотной и пористой пьезокерамики; в работах [9, 19, 21] реализована процедура оптимизации рабочих характеристик многослойного излучателя с пористым пьезоактивным слоем.



Сдано в набор \_\_.\_\_.\_\_\_\_. Подписано в печать \_\_.\_\_.\_\_\_\_.  
Формат 60x84 1/16. Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,1.  
Бумага офсетная.  
Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

Отпечатано в ЗАО «Центр универсальной полиграфии»  
344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 140,  
телефон 8-918-570-30-30  
[www.copyb1.ru](http://www.copyb1.ru)  
e-mail: [info@copyb1.ru](mailto:info@copyb1.ru)