

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Моисеенко Игоря Алексеевича на тему «ЗАДАЧИ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ С УСЛОЖНЕННЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Предметом исследований, выполненных в диссертации, являются аналитические методы решения и разработка эффективных методов численной реализации исследований влияния параметров конструкций на спектры и свойства упругих волн в цилиндрах с сечениями усложненной геометрии из радиально-неоднородных анизотропных линейных и нелинейных материалов.

Актуальность темы исследований обусловлена, с одной стороны, широким распространением в природе и в технических конструкциях цилиндрических волноводов круговых и некруговых поперечных сечений. А с другой стороны множеством недостаточно исследованных до настоящего времени специфических особенностей функционирования волноводов цилиндрической формы, связанных с комплексным учетом различных факторов усложнения их физико-механических и геометрических свойств. Важно отметить, что наряду с традиционными математическими моделями волнового деформирования полых и сплошных анизотропных цилиндров в диссертационной работе рассмотрены задачи учета влияния фактора неканонической геометрии поперечного сечения, геометрической и физической нелинейности материалов, а также функционально-градиентной неоднородности упругих свойств современных анизотропных материалов. Большое внимание в работе уделено развитию и математическому обоснованию корректности применяемых автором аналитических и численно-аналитических методов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Представленные в диссертации результаты исследований получены в процессе участия в работах по конкурсным исследовательским проектам: «Резонансные явления и эффекты локализации волновых полей в геометрически сложных существенно анизотропных телах и элементах конструкций» (МОНУ, №0199U001502, 1999-2000гг.); «Возбуждение, распространение и рассеяние нелинейных упругих волн в трехмерных кристаллических пластинах и цилиндрических телах» (МОНУ, №0101U005370, 2001-2003гг.); «Волновые процессы в низкосимметричных пьезокристаллических и пьезомагнитных телах пространственной геометрии» (МОНУ, №0104U002148, 2004-2006гг.); «Нормальные и поверхностные волны деформаций в трехмерных анизотропных волноводах усложненного геометрического строения» (МОНУ, №0107U001464, 2007-2009гг.); «Пространственные поля линейных и нелинейных нормальных волн деформаций в составных анизотропных телах призматического, цилиндрического и слоистого строения» (МОНУ, №0107U003466, 2010-2012гг.); «Волны деформаций в анизотропных телах с локализованными

участками неоднородности геометрических и физико-механических свойств» (МОНУ, МОН ДНР, №0113U001529, 2013-2016гг.); «Математическое моделирование прочностных и волноводных свойств деформируемых элементов конструкций и геоструктур с усложненными физико-механическими свойствами» (МОН ДНР, №0117D000071, 2017-2019гг.). Основные результаты диссертационной работы включены в отчеты по указанным НИР.

Диссертационная работа состоит из введения, восьми разделов, заключения с основными выводами и результатами, списка литературы из 399 источников. Работа содержит 86 рисунков и 6 таблиц, изложена на 297 страницах, из которых 254 страницы занимает основное содержание.

Из 399 наименований списка литературы на издания последних 5 лет приходится 16%. Иностранные издания составляют 52%.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее связь с научными программами; сформулированы цель, задачи исследования и выносимые на защиту положения работы; указаны научная новизна, фундаментальная и практическая значимость полученных результатов; охарактеризованы методы исследования, достоверность и обоснованность основных положений и выводов работы, а также приведены данные о публикациях и апробациях по результатам отраженных в диссертации исследований.

В первом разделе работы представлен анализ состояния исследований по проблемам волнового деформирования цилиндрических тел и дана постановка рассматриваемых в диссертации практических задач в рассматриваемой области. Охарактеризован и проанализирован вклад в решение относящихся к рассматриваемой проблематике научных задач, внесенный в различные периоды времени исследованиями ряда отечественных и зарубежных школ механиков в области анализа фундаментальных свойств и спектров нормальных волн деформаций в упругих волноводах; в области исследования закономерностей волнового деформирования анизотропных и непрерывно-неоднородных тел, композитов и метаматериалов; в области исследования особенностей в полях статических напряжений, а также динамических напряжений, генерируемых при колебаниях и распространении упругих волн в упругих телах и элементах конструкций; в области анализа свойств бесконечных систем алгебраических уравнений и сходимости представлений в рядах в процессе исследования задач волновой механики, а также ряд научных работ других исследователей. На основе анализа и систематизации материалов опубликованных исследований сформирован вывод об актуальности темы диссертации и важности реализации ее основных заданий. Далее в разделе в контексте общей постановки представлены рассматриваемые в работе модели волновой динамики – линейная модель динамического деформирования однородных и неоднородных идеально упругих трансверсально-изотропных, цилиндрически-ортотропных и прямолинейно-ортотропных сред, а также модель геометрически и физически нелинейного деформирования трансверсально-изотропной среды, базирующейся на теории конечных деформаций и представлениях упругого потенциала с квадратичными и

кубическими членами по деформациям. Рассматриваемая в работе модель нелинейного деформирования однородных трансверсально-изотропных цилиндров с учетом эффектов геометрической и физической нелинейности базируется на тензорной форме представления функции упругого потенциала с квадратичными членами по конечным деформациям.

Во **втором разделе** работы исследуются волны деформаций в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных функционально-градиентных цилиндрах кругового поперечного сечения в рамках линейных моделей с однородными краевыми условиями. В аналитическом виде построены полные системы базисных частных решений систем дифференциальных уравнений модели. Исследовано влияние введенного в представления указанных базисных частных решений специального параметра δ на скорость сходимости рядов. Для всех типов волн найдено единое оптимальное по данному критерию значение параметра δ , при котором в частных случаях радиальной неоднородности замкнутые представления амплитудных составляющих базисных частных решений для крутильных волн не содержат экспоненциальных членов.

Для применения разработанных методик в численных исследованиях создан комплекс специализированных программных приложений. С его использованием осуществлена верификация методик на основе сопоставления результатов их реализации в предельных частных случаях однородных трансверсально-изотропных и цилиндрически ортотропных волноводов с представленными в литературе результатами других исследований.

Выполнен анализ ряда эффектов влияния параметров неоднородности на топологическую структуру и свойства действительных ветвей дисперсионных спектров для волноводов рассматриваемого типа. С этой целью, в частности, осуществлено сопоставление ветвей дисперсионных спектров бегущих нормальных изгибных волн в однородном свободном цилиндре из цинка и радиально неоднородном свободном цилиндре с варьируемым параметром экспоненциальной неоднородности из материала, упругие характеристики которого в предельном случае однородности свойств принимают значения модулей упругости цинка. Реализован анализ количественных различий в поведении пяти низших мод сопоставляемых спектров. Установлено, что характер предельного асимптотического стремления фазовых скоростей мод бегущих волн с одинаковыми номерами в высокочастотном коротковолновом диапазоне из спектров для однородных и неоднородных цилиндров качественно совпадает. Сделан вывод о том, что влияние неоднородности имеет большую степень для высших мод, фазовые скорости которых в однородных цилиндрах стремятся к скоростям объемных волн для их материалов. Эффект влияния фактора неоднородности для низшей моды с асимптотическим стремлением скорости к скорости поверхностной волны релеевского типа состоит в переходе соответствующей дисперсионной кривой на параллельную траекторию. Также установлено существенное влияние фактора неоднородности на траектории дисперсионных кривых в зонах локального сближения и расталкивания мод.

Третий раздел посвящен задачам о волнах деформаций в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных функционально-градиентных цилиндрах секторно-кругового поперечного сечения для случаев наличия гибких нерастяжимых покрытий на радиальных участках граничной поверхности. Определены ограничения на параметры в представлениях частных решений волновых уравнений, обеспечивающие их физическую корректность, заключающуюся в ограниченности плотности описываемых указанными решениями энергетических потоков в окрестности сингулярной точки границы сечения волновода.

Построены базисные наборы частных решений вспомогательных спектральных задач. Установлена зависимость фактора наличия в описываемых построенными решениями полей напряжений особенностей в окрестности внутреннего ребра от угловой меры сектора в сечении волновода, а в случае цилиндрически ортотропных материалов и от нормированных модулей упругости однородного материала \tilde{c}_{jp} . Определен характер указанных особенностей.

Для численной реализации предложенного метода разработан комплекс специализированных программных приложений. В процессе верификации полученных на базе его применения результатов, проводилось их сопоставление с представленными в публикациях частными случаями исследований для однородных трансверсально-изотропных волноводов секторно-кругового сечения. Проведен анализ влияния факторов угловых размеров секторного выреза, параметров неоднородности и характера анизотропии на структуру и свойства действительных ветвей дисперсионных спектров, на формы волновых движений. Обобщены данные о траекториях дисперсионных кривых, данные об асимптотиках фазовых скоростей в высокочастотном коротковолновом диапазоне. При этом на представленных в работе рисунках отражены эффекты различия в предельных значениях, а также в знаках введенной в работе специальной функции сравнения для мод с одинаковыми номерами в спектре, отклонений для фазовых скоростей нормальных волн низших мод и нормальных волн всех остальных мод, начиная со второй, обусловленных неоднородностью материала. Проанализировано влияние неоднородности на сопоставляемые характеристики в относительно длинноволновом диапазоне.

В четвертом разделе диссертации исследуются волны деформаций в трансверсально-изотропных функционально-градиентных цилиндрах секторно-кругового поперечного сечения, все участки граничной поверхности которых являются свободными либо жестко закрепленными. Базисные решения для уравнений рассматриваемых моделей записываются с использованием трех частных решений, имеющих единую асимптотику в окрестности внутреннего ребра волновода. Для описания нормальных волн в рассматриваемых волноводах вводятся разложения по базисным решениям с неизвестными векторными коэффициентами и с ограничениями, обеспечивающими физическую корректность представлений. Построены аналитические и

численно-аналитические решения двух вспомогательных спектральных задач для случая свободных и двух вспомогательных спектральных задач для случая закрепленных радиальных участков с формированием представлений для последующего получения дисперсионных соотношений в соответствующих вариантах исходной задачи.

С использованием разработанного для осуществления расчетов по описанной методике программного приложения реализовано исследование нескольких вариантов данной задачи. В результате получено описание ряда эффектов, обусловленных варьированием параметров неоднородности, угловой меры секторного сечения и частоты на структуру и свойства анализируемых дисперсионных спектров. В частности, представлены результаты сравнительного анализа дисперсионных спектров бегущих нормальных волн S-типа в неоднородных и однородных круговых цилиндрах с малым секторным вырезом в поперечном сечении.

Установлен ряд свойственных рассматриваемым волновым процессам физико-механических эффектов. Так, для волноводов со свободной границей в низкочастотном длинноволновом диапазоне волны низшей моды с нулевой частотой заперения по форме являются квазиизгибными, а волны второй моды с нулевой частотой заперения – квазипродольными. Показано, что для однородного и неоднородного цилиндров дисперсионные спектры имеют высокие степени подобия в обоих случаях задания краевых условий. В рассматриваемых спектрах для неоднородного волновода со свободной границей высшие моды, начиная со второй, сохраняют подобие траекторий и расположены выше дисперсионных кривых для однородного свободного цилиндра. Как следствие, нормальные волны одинаковой длины в неоднородном цилиндре имеют относительно большие скорости, а в случае цилиндров с закрепленной граничной поверхностью отмеченная тенденция для всех исследованных мод меняется на противоположную.

В пятом разделе приведены результаты разработки и реализации методов численно-аналитического исследования спектров и свойств упругих волн деформаций в функционально-градиентных трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных цилиндрах кольцевого и секторно-кольцевого сечений.

В процессе построения методики интегрирования систем уравнений волнового деформирования для рассматриваемых моделей осуществлен переход от радиальной координаты r к обобщенной кольцевой координате x .

Для матричных коэффициентов в рекуррентных соотношениях получены асимптотические оценки при больших значениях параметра m , позволяющие обосновать равномерную и абсолютную сходимости разложений на всем отрезке изменения параметра x .

С использованием разработанного для осуществления расчетов по описанной методике верифицированного программного приложения реализовано исследование ряда вариантов данной задачи, позволяющее дать обобщенную трактовку эффектов трансформаций в структуре и свойствах анализируемых дисперсионных спектров, обусловленных варьированием

параметров неоднородности, частоты, окружного волнового числа и механической анизотропии. Ряд этих эффектов подтверждают результаты сравнительного анализа спектров бегущих нормальных изгибных волн в радиально неоднородном или однородном свободных цилиндрически ортотропных цилиндрах при сопоставлении с ранее приведенными в третьем разделе работы результатами численных исследований. Отмечено, что на траектории дисперсионных кривых трех низших мод спектра в длинноволновом диапазоне фактор неоднородности в рассматриваемом случае оказывает достаточно малое влияние.

Сделано заключение об усложнении картины влияния фактора неоднородности в случае волноводов с данной геометрией сечений, для которых топологическая структура спектров характеризуется большим числом узких частотных диапазонов локального сближения и расталкивания смежных мод спектра с выраженной картиной «обмена» групповыми скоростями соответствующих этим модам нормальных бегущих волн. Установлено, что общей тенденцией в распределениях дисперсионных кривых в этих областях является резкое сближение верхней из сходящихся кривых после прохождения точки расталкивания с траекторией соответствующей кривой для однородного цилиндра и противоположный эффект «отдаления» нижней из сходящихся кривых после расталкивания от траектории соответствующей моды однородного цилиндра.

В шестом разделе представлена разработка численно-аналитической методики исследования процессов распространения осесимметричных продольно-сдвиговых нормальных волн в функционально-градиентных цилиндрах кольцевого поперечного сечения из трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных материалов с жидкостным заполнением. Построена и реализована методика получения и анализа дисперсионных соотношений для волноводов данного типа; разработано и верифицировано программное приложение, с применением которого на основе численных исследований описаны и обобщены отдельные эффекты влияния факторов неоднородности, частоты, физико-механических свойств компонентов волновода на структуру и свойства анализируемых дисперсионных спектров.

В качестве примера описания обнаруживаемых эффектов представлены результаты сравнительного анализа дисперсионных спектров бегущих нормальных осесимметричных волн в радиально неоднородном и однородном цилиндрах со свободной внешней граничной поверхностью и с параметрами \tilde{c}_{jp} равными нормированным значениям модулей упругости цинка. Внутренним заполнителем является вода.

В седьмом разделе работы представлены исследования по проблеме описания малых нелинейных ангармонических эффектов при распространении упругих волн в трансверсально-изотропных круговых цилиндрах радиуса R . Разработанный подход базируется на концепции введения малого параметра δ в виде отношения максимальных амплитуд волновых упругих смещений к характерному линейному размеру сечения волновода R . Методика численно-

аналитического исследования рассматриваемой модели базируется на построенном итерационном алгоритме для последовательного нахождения в комплексных функциях перемещений линейных составляющих и нелинейных ангармонических возмущений. В основу алгоритма положена процедура выделения и приравнивания членов одного порядка малости по δ в нелинейных уравнениях волнового деформирования и в краевых условиях на цилиндрической поверхности.

Выполнен цикл исследований кинематических характеристик нелинейных ангармонических возмущений для нормальных волн кручения в цилиндрических волноводах из редкоземельного металла гадолиния с закрепленной либо имеющей гибкое нерастяжимое покрытие боковой поверхностью. Исследован также частный случай учета в рассматриваемой модели только одного фактора геометрической нелинейности применительно к цилиндру с покрытием аналогичного типа на граничной поверхности.

Восьмой раздел диссертации посвящен разработке методологии интегрирования уравнений стационарного динамического деформирования низко-симметричных анизотропных сред применительно к задачам волновой механики сплошных протяженных цилиндрических тел из прямолинейно-анизотропных материалов орторомбической системы с криволинейной гладкой границей сечения. Задача сведена к построению базисного набора частных решений внутреннего типа для системы специального вида из трех эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных.

Для определения матричных коэффициентов в разложениях искомым частным решений построена рекуррентная последовательность краевых задач для систем разностных уравнений второго порядка с постоянными матричными коэффициентами. Показано, что краевые задачи являются хорошо обусловленными. В качестве метода решения граничных задач предложено применение метода прогонки в матричной форме.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов работы опирается на использование апробированных математических моделей исследуемых деформационных процессов; подтверждается строгостью и корректностью постановки рассматриваемых задач; использованием при исследованиях апробированных корректных математических методов; применением критериев сходимости к представлениям, получаемым в форме функциональных рядов; согласованностью результатов, полученных разрабатываемыми в диссертации методами в предельных частных случаях с опубликованными результатами других исследователей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

Соискателем получены следующие **новые научные результаты**.

Построение и исследование свойств базисных множеств аналитических частных решений уравнений волнового деформирования для краевых задач о спектрах нормальных упругих волн в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных цилиндрах кругового и кольцевого сечения с экспоненциально-степенной радиальной неоднородностью.

Построение аналитических представлений базисных частных решений для краевых задач о спектрах нормальных упругих волн в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных волноводах секторно-кругового и секторно-кольцевого сечения с экспоненциально-степенной радиальной неоднородностью физико-механических свойств при наличии на радиальных участках граничной поверхности гибких нерастяжимых покрытий.

Построение и исследование свойств базисных множеств аналитических и численно-аналитических решений вспомогательных спектральных задач для обладающих радиальной неоднородностью экспоненциально-степенного типа трансверсально-изотропных волноводов с сечением в виде кругового сектора в случае свободных либо жестко закрепленных радиальных участков граничной поверхности.

Исследование асимптотических свойств решений рассматриваемых основных и вспомогательных спектральных задач.

Получение и исследование дисперсионных соотношений для нормальных волн в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных волноводах исследуемого геометрического строения со свободными и жестко закрепленными цилиндрическими участками граничной поверхности с радиальной неоднородностью экспоненциально степенного типа на основе использования базисных множеств частных решений уравнений модели и вспомогательных спектральных задач.

Получение и исследование дисперсионных соотношений для нормальных волн в трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных радиально неоднородных волноводах кольцевого сечения с заполнением внутренней полости идеальной слабосжимаемой жидкостью.

Разработана теоретическая численно-аналитическая методика исследования малых нелинейных ангармонических эффектов при распространении упругих волн кручения в трансверсально-изотропных цилиндрах кругового сечения с использованием модели геометрически и физически нелинейного деформирования.

Построение и исследование свойств базисных множеств аналитических частных решений уравнений волнового деформирования применительно к краевым задачам о спектрах нормальных упругих волн в сплошных цилиндрических волноводах гладкого криволинейного сечения из прямолинейно ортотропных упругих материалов.

Разработка и реализация методик анализа параметрических закономерностей в топологическом строении и составе дисперсионных спектров нормальных волн, в распределениях их фазовых и групповых скоростей, а также в кинематических характеристиках волновых движений применительно к цилиндрам с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами.

Обобщение и систематизация полученных новых фундаментальных данных о закономерностях влияния особенностей усложненной геометрии сечений, типов граничных условий, радиальной неоднородности, анизотропии и нелинейности физико-механических свойств материалов волноводов на

структуры дисперсионных спектров и особенности кинематических характеристик исследуемых нормальных волн, представляющие первоочередной интерес для сферы практических приложений.

Замечания по содержанию работы и автореферата.

1) В четвертом и седьмом разделах работы с учетом различающихся наборов факторов усложнения геометрических и физико-механических свойств волноводов рассмотрены модели только для трансверсально-изотропных материалов. В работе и автореферате отсутствуют объяснения причин исключения из рассмотрения цилиндрически-ортотропных материалов.

2) В четвертом разделе дисперсионная задача ставится на цилиндрическом участке граничной поверхности на основе построенных базисных наборов частных решений соответствующих спектральных задач.

Чем обоснован отказ от постановки дисперсионной задачи сразу на всей граничной поверхности с использованием соответствующего рассматриваемой области базисного набора частных решений волновой динамики без предварительного рассмотрения вспомогательных спектральных задач?

3) В шестом разделе рассмотрены модели волноводов с жидкостным заполнением кольцевого поперечного сечения из трансверсально-изотропных и цилиндрически-ортотропных радиально неоднородных материалов, однако результаты численных исследований представлены только для случая трансверсально-изотропного материала. Для полноты исследований целесообразно было бы рассмотреть и случай цилиндрически-ортотропного материала.

4) В автореферате при обзоре результатов, представленных в третьем разделе работы, отсутствуют важные, с точки зрения свойств построенных частных решений спектральных задач, описания характера сингулярности, возникающей в поле напряжений на ребре $r=0$ волновода из цилиндрически-ортотропного материала, хотя указанные описания приведены в диссертации.

Сделанные замечания не влияют на общую позитивную оценку новых научных результатов, полученных автором диссертационного исследования.

Таким образом, в диссертации Игоря Алексеевича Моисеенко решена новая научно-техническая проблема, которая состоит в создании и обосновании нового численно-аналитического метода волновой механики цилиндрических тел с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами.

Решение этой актуальной проблемы механики деформируемого твердого тела имеет теоретическое и прикладное значение. Удачная разработка автора и выполненное им математическое обоснование нового метода заметно обогатили аппарат аналитического исследования сложных линейных и нелинейных волновых явлений природы и технических приложений. Новые доказательства теорем, полученные новые научные результаты в области волновой механики деформируемых твердых тел составляют существенный вклад в развитие этой отрасли науки.

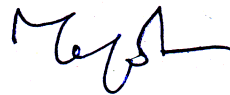
Диссертацию можно признать самостоятельной и завершённой научной работой. Тематика представленных в диссертационной работе научных исследований и полученных научных результатов в полной мере соответствует паспорту научной специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела. Содержание диссертации в достаточной мере освещено в 50 опубликованных работах, из которых 13 опубликованы без соавторов. Автореферат диссертации соответствует содержанию и адекватно отражает полученные основные научные положения. Оформление и содержание диссертации и автореферата удовлетворяют требованиям ВАК.

Диссертационная работа на тему «Задачи волновой механики цилиндрических тел с усложнёнными геометрическими и физико-механическими свойствами» в целом отвечает всем требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям.

Считаю, за полученные новые научные результаты **Моисеенко Игорь Алексеевич** заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
прикладной математики
Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования Таврическая академия
Крымского федерального университета
им. В.И. Вернадского
295007, Республика Крым, г. Симферополь,
проспект Академика Вернадского, 4.
Телефон: +7 (3652) 63-75-46, 60-80-09, 51-64-98
E-mail: ta.cfu@mail.ru
WWW: <http://cfuv.ru/>

Чехов Валерий Николаевич



Я, Чехов Валерий Николаевич, согласен на автоматизированную обработку моих персональных данных _____

(подпись)

