

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Моисеенко Игоря Алексеевича «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

**Актуальность темы диссертации.** Исследования в области анализа математических моделей волновой динамики цилиндрических тел имеют длительную историю. Это, в первую очередь, связано с широким применением в машинах, приборах и строительных сооружениях деталей и конструктивных элементов цилиндрической формы. Сегодняшнее появление новых вариантов постановки задач волновой механики деформируемых сред для указанного класса объектов является естественным процессом, связанным как с современными запросами инновационных научно-технических отраслей, так и с последними достижениями в технологиях изготовления и обработки новых конструктивных материалов, в том числе и формируемых методами 3D печати. Правомерно также и заключение об актуализации вопросов исследования многих, не решенных ранее ввиду сложности, известных классов пространственных краевых задач стационарной волновой динамики анизотропных цилиндрических тел.

Обе указанные тенденции являются катализатором интенсивных теоретических исследований по разработке новых аналитических и численно-аналитических методов математического моделирования в области распространения волн деформаций в упругих телах цилиндрической формы с учетом различных факторов усложнения их физико-механических и геометрических свойств. К числу таких факторов относятся: учет различных типов анизотропии и непрерывной радиальной неоднородности механических свойств функционально-градиентных материалов цилиндров; неканоническая геометрия поперечных сечений рассматриваемых волноводов, к которой, в частности, относятся случаи их гладкого криволинейного очертания, случаи наличия продольных вырезов с секторными сечениями произвольной угловой мерой в полых и сплошных цилиндрах; варианты задания неклассических смешанных краевых условий на различных гладких участках граничных поверхностей. К ряду усложняющих факторов также относятся наличие жидкостного заполнения в полых анизотропных функционально-градиентных цилиндрах; учет свойств геометрической и физической нелинейности в моделях анизотропных цилиндрических упругих волноводов.

Разработка новых аналитических и численно-аналитических методов решения указанных классов задач волновой механики цилиндрических тел с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами, во-первых, способствует развитию методологической базы фундаментальных и прикладных исследований в рассматриваемой научной области; во-вторых, является инструментом получения выводов о качественных особенностях



рассматриваемых деформационных процессов, включая асимптотические свойства характеристик волн в предельных частотных диапазонах и, наконец, обеспечивает возможности дополнительной верификации результатов применения прямых численных методов к некоторым рассматриваемым проблемам данного класса.

Таким образом, с учетом всего комплекса перечисленных факторов, можно с полным основанием констатировать актуальность темы данного диссертационного исследования, как для фундаментальной науки, так и для решения целого ряда современных прикладных проблем важного народно-хозяйственного значения.

**Новизна и значимость научных результатов.** Исходя из анализа научных результатов автора, представленных в автореферате и в восьми разделах диссертации, а также на основе изучения библиографического списка его научных публикаций, можно сделать вывод о том, что все сформулированные цели и задачи исследования в полной мере реализованы, полученные научные результаты с самой высокой степенью полноты отражены в опубликованных автором работах.

К наиболее значимым новым результатам проведенного исследования следует отнести следующие результаты в рассматриваемых тематических областях.

В области исследования математических моделей распространения нормальных волн деформаций в трансверсально-изотропных и цилиндрически ортотропных функционально-градиентных цилиндрах с экспоненциально-степенной радиальной неоднородностью материала, имеющих поперечное сечение:

1) круговой формы – впервые разработаны методики построения базисных множеств частных решений уравнений волнового деформирования для краевых задач о спектрах осесимметричных и неосесимметричных нормальных упругих волн; впервые в замкнутой форме с использованием функций Уиттекера построены базисные наборы частных решений системы уравнений волновой механики для крутильных волн в двух частных случаях экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материала; построены и исследованы дисперсионные соотношения для крутильных, осесимметричных продольно-сдвиговых и неосесимметричных нормальных волн; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов волноводов на картину топологического строения дисперсионных спектров, кинематические характеристики, распределений фазовых и групповых скоростей бегущих нормальных осесимметричных и неосесимметричных волн для случаев свободной и жестко закрепленной граничной поверхности;

2) секторно-круговой формы при наличии гибких нерастяжимых покрытий на радиальных участках граничной поверхности – впервые разработана методика построения и исследования аналитических представлений базисных частных решений вспомогательных спектральных



задач; построены и исследованы дисперсионные соотношения для двух типов симметрии волновых движений; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов и угловой меры сектора в сечении волновода на картину топологического строения дисперсионных спектров, распределений фазовых и групповых скоростей бегущих нормальных волн для случая свободного цилиндрического участка граничной поверхности;

3) кольцевой формы – впервые разработаны методики построения базисных множеств частных решений уравнений волнового деформирования для краевых задач о спектрах осесимметричных и неосесимметричных нормальных упругих волн; впервые в замкнутой форме построены базисные наборы частных решений системы уравнений волновой механики для крутильных волн в двух частных случаях экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материала, представленные через функции Уиттекера и интегралы биконфлюэнтного уравнения Гойна; построены и исследованы дисперсионные соотношения для крутильных, осесимметричных продольно-сдвиговых и неосесимметричных нормальных волн; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов волноводов на картину топологического строения дисперсионных спектров, кинематические характеристики, распределений фазовых и групповых скоростей бегущих нормальных осесимметричных и неосесимметричных волн для случаев свободных и жестко закрепленных граничных поверхностей;

4) секторно-кольцевой формы при наличии гибких нерастяжимых покрытий на радиальных участках граничной поверхности волноводов – впервые разработана методика построения и исследования аналитических представлений базисных частных решений вспомогательных спектральных задач; построены и исследованы дисперсионные соотношения для двух типов симметрии волновых движений; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов и угловой меры кольцевого сектора в сечении волновода на картину топологического строения дисперсионных спектров, распределений фазовых и групповых скоростей бегущих нормальных волн для случая свободных цилиндрических участков граничной поверхности;

5) кольцевой формы при наличии идеального слабосжимаемого жидкостного заполнителя – разработана модифицированная методика получения и исследования дисперсионных соотношений; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов анизотропного полого цилиндра с жидкостным заполнением на топологию действительных ветвей дисперсионных спектров и на распределения фазовых скоростей бегущих осесимметричных нормальных волн.

В области исследований нормальных волн деформаций в свободных либо жестко закрепленных по всей граничной поверхности трансверсально-изотропных функционально-градиентных цилиндрах с экспоненциально-

степенной радиальной неоднородностью материала, имеющих поперечное сечение в форме кругового сектора – впервые поставлены и решены вспомогательные спектральные задачи для двух типов симметрии волновых движений; исследованы основные свойства полученных решений и разработана методика построения дисперсионных соотношений для волн исследуемого типа с использованием полученных базисных множеств решений соответствующих вспомогательных спектральных задач; впервые решена задача учета в дисперсионных соотношениях членов, порождающих все возможные типы особенностей в поле напряжений в окрестности сингулярных точек границы волновода; построены и исследованы дисперсионные соотношения для двух типов симметрии волновых движений; обобщены и систематизированы новые закономерности влияния параметров экспоненциально-степенной радиальной неоднородности материалов и угловой меры сектора в сечении волновода на картину топологического строения дисперсионных спектров и кинематические характеристики бегущих нормальных волн для случаев свободной и жестко закрепленной граничной поверхности.

В области исследования нелинейных ангармонических эффектов при распространении нормальных упругих волн в протяженных трансверсально-изотропных цилиндрах с усложненными свойствами впервые на базе использования модели геометрически- и физически-нелинейного деформирования реализовано численно-аналитическое исследование малых нелинейных эффектов генерирования вторых гармоник монохроматических осесимметричных волн кручения.

В области разработки новых эффективных методик интегрирования уравнений стационарного динамического деформирования низкосимметричных анизотропных сред применительно к задачам волновой механики цилиндрических тел впервые разработана модифицированная методика построения базисных множеств частных решений уравнений волнового деформирования в форме кратных степенных рядов комплексных переменных для краевых задач о спектрах нормальных упругих волн в сплошных цилиндрах из прямолинейно ортотропных упругих материалов с гладкой криволинейной границей поперечного сечения.

Впервые даны 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.

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы** заключается в создании эффективных численно-аналитических методов решения новых классов задач волновой механики цилиндрических тел с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами, которые являются инструментами предпроектного моделирования для выработки эффективных



технических решений в ряде современных научно-промышленных отраслей таких, как проектирование новых поколений волноводных компонентов акустоэлектронных устройств; технологии неразрушающего ультразвукового контроля промышленных изделий, в частности продукции трубного производства, упрочняемых осей и валов в ответственных конструкциях двигателестроения; ультраакустическая диагностика конструкций из новых поколений неоднородных нанокompозитных материалов; моделирование и расчеты нелинейных акустоэлектронных устройств для интегрирования и усиления информационных сигналов.

**Достоверность и обоснованность** основных результатов и выводов работы обосновываются использованием апробированных математических моделей исследуемых деформационных процессов; 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 методами в предельных частных случаях, с опубликованными результатами других исследователей.

#### **Замечания по содержанию работы.**

Не подвергая сомнениям научные заслуги диссертанта, необходимо отметить отдельные аспекты диссертационной работы, которые, как представляется, требуют разъяснения.

1. Проведенное во втором, третьем, пятом и шестом разделах работы исследование математических моделей функционально-градиентных цилиндрических упругих волноводов реализовано применительно к двум типам анизотропии их материалов, в то время как в четвертом разделе рассмотрен только случай трансверсально-изотропных волноводов. С позиций логики исследования, целесообразным было бы рассмотрение и в четвертом разделе работы методов исследования граничных задач о спектрах нормальных волн в телах из цилиндрически ортотропных материалов.

2. Представленное в третьем и четвертом разделах работы исследование функционально-градиентных цилиндрических волноводов секторно-кругового поперечного сечения охватывает три типа граничных условий на радиальных участках граничной поверхности, в то время как в пятом разделе, применительно к волноводам секторно-кольцевого поперечного сечения, рассматривается только единственный случай наличия на радиальных участках граничной поверхности гибких нерастяжимых покрытий. Соответственно и для волноводов секторно-кольцевого поперечного сечения представляло бы интерес исследование граничных задач с краевыми условиями свободных и жестко закрепленных радиальных участков граничных поверхностей.

3. В четвертом разделе работы определение векторных коэффициентов разложений собственных функций для одной из групп собственных значений поставленных вспомогательных спектральных задач сводится к решению функционального матричного уравнения (4.91) на странице 132. Чем



обусловлен выбор в качестве метода решения этого уравнения интегрального метода наименьших квадратов?

4. В четвертом разделе работы ставятся четыре вспомогательные задачи соответственно две на страницах 112-113 для случая свободных и две на странице 133 для случая жестко закрепленных радиальных участков граничной поверхности. На основе построенных решений указанных спектральных задач в п.п. 4.3 определяются целевые дисперсионные соотношения для соответствующих граничных задач с однотипными граничными условиями на всех участках граничной поверхности волновода. Возникает вопрос, допустимо ли реализованную в данном разделе работы методику построения дисперсионных соотношений распространить на случай, свободных радиальных участков и жестко закрепленного цилиндрического участка граничной поверхности волновода, либо наоборот?

5. В седьмом разделе работы, посвященном исследованию нелинейных ангармонических эффектов при распространении упругих волн в цилиндрах с усложненными свойствами, в качестве частного варианта исследуемой общей модели нелинейного динамического деформирования трансверсально-изотропных сред рассматривается модель учета отдельно взятого фактора геометрической нелинейности процесса деформирования (п.п. 7.3, стр. 213). В этой связи, было бы целесообразным рассмотреть и частную модель учета отдельно взятого фактора физической нелинейности (нелинейности определяющих соотношений для трансверсально-изотропного материала волновода).

Сделанные замечания не влияют на общую позитивную оценку полноты и значимости научного вклада автора диссертационного исследования.

Диссертация Моисеенко И.А. представляет собой самостоятельное завершённое научное исследование на актуальную тему, в результате которого решена крупная научная проблема, имеющая важное фундаментальное, а также прикладное народнохозяйственное значение. Совокупность вынесенных на защиту научных положений и результатов имеет высокий приоритетный уровень научной новизны. В тематическом отношении и по спектру конкретных полученных научных результатов, диссертационная работа в полной мере соответствует паспорту научной специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. Результаты исследования с достаточной степенью полноты представлены в пятидесяти научных публикациях автора, в числе которых двадцать три статьи в реферируемых изданиях из соответствующего квалификационного перечня. Результаты работы прошли обширную высокоуровневую апробацию на различных научных форумах и семинарах. Текст автореферата в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Вышеизложенное позволяет сделать следующее заключение. Диссертационная работа на тему «Задачи волновой механики цилиндрических тел с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами»,

представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, соответствует всем требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Моисеенко Игорь Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры уравнений в частных  
производных и теории вероятностей  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения

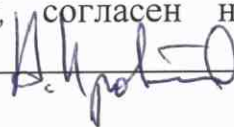
высшего образования «Воронежский  
государственный университет»



Провоторов Вячеслав Васильевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский государственный университет»,  
394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1  
+7 (473) 220-75-21  
[office@main.vsu.ru](mailto:office@main.vsu.ru)

Я, Провоторов Вячеслав Васильевич, согласен на автоматизированную  
обработку моих персональных данных \_\_\_\_\_




федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Провоторова В.В.</i>
заворяя	<i>без снисхождения</i>
	<i>20.11.2018</i>
подпись, расшифровка подписи	