

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу

**Мякишевой Ольги Александровны**

**«Динамические задачи акустического зондирования слоистых упругих материалов»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

### **Актуальность избранной темы**

Диссертационная работа Мякишевой О.А. «Динамические задачи акустического зондирования слоистых упругих материалов» посвящена исследованию актуальной темы, а именно: мониторингу волнового поля в элементах конструкций, основанному на анализе процессов возбуждения и распространения объемных, бегущих, вытекающих волн в связанной системе: слоистый упругий волновод - акустическая среда - источник.

Новые композиционные материалы все шире используются при решении проблем звуко- и виброизоляции, гидроакустической скрытности. Эксплуатация таких материалов часто проходит в экстремальных условиях, поэтому весьма актуальна задача контроля их механических свойств, которая продиктована повышенными требованиями к качеству композиционных материалов. Вместе с этим, необходим контроль целостности больших площадей конструкций, который может быть осуществлен на основе систем неразрушающего контроля волнового мониторинга состояния конструкций. Однако влияние окружающей акустической среды (жидкости или газа) приводит к значительному усложнению волновых явлений в упругих структурах: за счет передачи энергии в окружающую среду усиливается затухание распространяющихся колебаний, происходит появление новых

типов бегущих волн, что требует учета данных эффектов в математических и компьютерных моделях и при проведении экспериментов, необходимых для развития SHM-систем.

Для решения перечисленных задач создаются новые технологии, теоретическая основа которых базируется на математическом моделировании сложных волновых явлений в упругих структурах при учете влияния окружающей акустической среды.

Из вышесказанного следует актуальность и практическая значимость данного диссертационного исследования, которая также подтверждена многочисленными грантами государственных фондов, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### **Содержание и новизна полученных результатов**

Во **введении** соискателем даётся достаточно подробный обзор имеющихся работ по теме диссертации, приведен исторический обзор развития моделей взаимодействия ультразвуковых волн с упругим слоем и методов решения соответствующих краевых задач. В обзоре отражены основные направления современного развития методов неразрушающего контроля, указывается актуальность проводимых исследований. Формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, указывается новизна и практическая значимость, а также обосновывается достоверность полученных результатов. Также приведены публикации автора по теме диссертационного исследования, список конференций, на которых были представлены основные результаты и проекты, в рамках которых проводилось исследование.

В **первой главе** диссертации излагаются основные положения динамической теории упругости, в рамках которой формулируются краевые задачи для тел, погруженных в акустическую среду. В общей трехмерной постановке выводится функция Грина для погруженного многослойного

анизотропного упругого слоя. В случае погруженного однородного изотропного слоя искомые функции представлены в явном виде. Дано описание математических моделей источников, которые используются в работе.

Во **второй главе** приводятся интегральные представления волновых полей в общей трехмерной постановке. В случае изотропного материала двукратные интегралы сведены к однократным. Для проверки адекватности построенной модели приведены сопоставления с экспериментальными и численными результатами других авторов.

В **третьей главе** анализируются дисперсионные свойства погруженного упругого волновода. Приводятся результаты натурального эксперимента для дисперсионных характеристик фундаментальных симметричных и антисимметричных мод Лэмба. Исследуется поведения моды  $A_0$  в низкочастотном диапазоне, показан выход полюса моды  $A_0$  с нефизического листа на физический. Асимптотические выражения для волновых полей в дальней от источника зоне строятся на основе интегральных представлений. Асимптотика бегущих и вытекающих волн строится в соответствии с леммой Жордана и теорией вычетов. Показано, что необходимо учитывать вклад в асимптотику интегралов по разрезу. На основе метода стационарной фазы получено асимптотическое представление в дальней от источника зоне для отраженного и прошедшего акустических полей в виде сферических волн. Показано, что асимптотика объемных волн, построенная методом стационарной фазы, не всегда верна, поскольку происходит сближение особенностей. Приводятся сопоставления с численными результатами других авторов.

В завершающей **четвертой главе** проводится анализ гармонических волновых полей и их энергетических характеристик. Приведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов. Анализируется зависимость осредненного за период колебаний количества энергии, проходящей через сферическую и цилиндрическую поверхности, показано,

что закон сохранения энергии выполняется. На основе энергетических характеристик проведен анализ параметров источника (относительный размер источника, расстояние до пластины и частота) для максимизации энергии волн определённого типа, что позволит в будущем использовать полученные результаты для настройки систем SHM. Рассмотрены обратные волны и связанные с ними резонансные эффекты. Показано, что эти эффекты проявляются нечетко, за счет изменения траекторий, по которым движутся полюса обратной волны. Рассмотрены энергетические свойства вытекающих обратных волн, представлены вертикальные профили плотности энергии.

### **Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов**

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием современного математического аппарата механики сплошных сред, корректными постановками задач теории упругости, математической строгостью методов их решения, сравнением с результатами, полученными другими авторами в рамках иных моделей, и сопоставлением с экспериментальными данными. **Научная и практическая значимость** определяется необходимостью разработки и реализации математических и компьютерных моделей процессов возбуждения и распространения упругих волн в погруженных слоистых структурах в приложении к проблемам неразрушающего контроля и волнового мониторинга состояния конструкций.

### **По работе имеются следующие замечания**

1. На стр. 35 приведены графики коэффициента прохождения  $k_T$  волнового поля через изотропную пластину, погруженную в воду в зависимости от частоты. Было бы интересно построить такую

зависимость для анизотропной пластины (трансверсально-изотропной, ортотропной).

2. В работе встречаются некоторые опечатки, например, на стр. 39 на рис. 3.1 в подписи вертикальных осей  $\text{Re } \zeta$  и  $\text{Im } \zeta$  отсутствует индекс  $n$ . На стр. 57 допущена опечатка в фамилии Фаддеева В.Н.
3. В виду большой значимости асимптотических представлений объемных волн с учетом сближения особенностей следовало бы в асимптотические представления осциллирующих интегралов на стр. 57 внести уточнение в терминологию, поскольку функция  $w(z)$  выражается через интеграл вероятности, который в свою очередь, в виду частного вида аргумента, выражается через интегралы Френеля.
4. Было бы интересно привести результаты, иллюстрирующие изменение структуры волнового поля в случае наклонного источника.

### **Заключение**

Указанные замечания несколько не умаляют высокий научный уровень представленной работы.

Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертации. Основные результаты исследования опубликованы в 14 работах в рецензируемых журналах и трудах конференций; из них 3 работы опубликованы в журналах, указанных в перечне ВАК, 2 работы опубликованы в журнале индексируемом в базах Web of Science и Scopus, 6 работ в трудах конференций, индексируемых в базе Scopus, а остальные в прочих печатных изданиях. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация является завершенным исследованием высокого научного уровня. Работа содержит новые результаты, вносящие большой вклад в развитие методов решения задач механики сплошных сред и волновой динамики. На основании вышеизложенного считаю, что диссертационное

исследование «Динамические задачи акустического зондирования слоистых упругих материалов» **удовлетворяет** требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям («Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а О.А. Мякишева **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент  
к. физ.-мат. наук, доцент,  
кафедра высшей математики  
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный  
университет путей сообщения» (РГУПС)  
344038 г. Ростов-на-Дону,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

« 18 » ноября 2019 г.

Беляк Ольга Александровна

Тел. +7 (863) 272-62-63  
e-mail: o\_bels@mail.ru

Подпись Беляк О. А.

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами  
ФГБОУ ВО РГУПС

« 18 » 11 20 19



Т.М. Канина