

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»,
доктор физ.-мат. наук, профессор



В.Б. Казанцев

«__» _____

2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (ННГУ),

г. Нижний Новгород,

на диссертационную работу **Евдокимова Александра Александровича**

«Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-

структурах с активными пьезосенсорами»,

представленную на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности

01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

1. Актуальность темы исследований

В настоящее время все большую популярность набирают системы, использующие поверхностные или объемные упругие волны, возбуждаемые и регистрируемые поверхностными или встроенными системами датчиков (актуаторов). В силу относительно небольшой стоимости в качестве актуаторов используют наклейки, выполненные из пьезокерамики. Бегущие волны, возбуждаемые пьезоактуаторами, взаимодействуют с неоднородностями любой природы и при этом распространяются на большие расстояния. По отраженному волновому полю можно судить о характере и расположении дефектов. Подобная технология неразрушающего контроля выделилась в самостоятельное научно-техническое направление – волновой мониторинг состояния конструкций (Structural Health Monitoring (SHM)), а сами элементы конструкций, диагностируемые при помощи систем датчиков, относят к смарт-

структурам. Одними из актуальных проблем данных областей является разработка математических и компьютерных моделей процессов возбуждения, распространения и дифракции упругих волн, на решения которых и направлена диссертационная работа. Помимо упомянутых выше областей науки и техники подобные задачи возникают в сейсмологии и сейсмостойком строительстве, машиностроении, виброзащите, акустоэлектронике, механотронике и др.

2. Общая характеристика работы.

Диссертация Евдокимова А.А. «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами» состоит из введения, шести глав основной части, заключения и списка литературы, содержащего в себе 138 источников.

Во *введение* указывается актуальность темы исследования, приводится обзор существующих подходов к решению рассматриваемых краевых задач, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, дается общая характеристика работы.

В *первой главе* формулируются краевые задачи линейной теории упругости, электроупругости и общей теории акустики, решаемые в последующих главах. Исходя из общих уравнений, начальных и граничных условий электроупругости формируются связанные краевые задачи о динамическом взаимодействии полосового и кругового пьезоактуатора. Указываются применяемые при этом упрощения.

Вторая глава посвящена описанию интегрального подхода решения краевых задач динамической теории упругости. В рамках данного подхода решение строится в виде свертки матрицы Грина с заданными поверхностными нагрузками или в виде произведения их Фурье-образов. Полученные интегральные представления решений также возможно заменить на суммы вычетов, слагаемые в которых представляют собой нормальные моды. Точки, в которых вычисляются вычеты, совпадают с волновыми числами бегущих волн. Соискателем подробно описываются дисперсионные характеристики возбуждаемых волн, а также приводятся основные формулы для расчета количества энергии, поступающей в среду от источника и распределяемой между модами.

Методы решения связанных краевых задач о динамическом взаимодействии пьезоактуатора с упругой подложкой приводятся в *третьей главе*. Данные задачи сводятся к интегро-дифференциальным уравнениям относительно неизвестных контактных напряжений и смещений. Численное решение

интегро-дифференциальных уравнений строится при помощи схемы Галеркина. Для проверки полученных решений приводятся сопоставления с результатами других моделей (конечно-элементная и точечно-силовая модель). Исходя из разработанных моделей, проводится расчет оптимальных сочетаний размеров актуатора и центральной частоты возбуждаемых волн, позволяющих максимизировать амплитуды волн, а также позволяющих возбудить одну доминирующую фундаментальную моду.

В *четвертой главе* описывается гибридная численно-аналитическая схема решения краевых задач теории упругости и акустики для сред с локальными неоднородностями. Предлагаемая соискателем схема описывается на решении модельной задачи акустики, а далее приводится решение аналогичной задачи теории упругости. Приводится сопоставление результатов гибридной схемы с результатами конечно-элементной модели, реализованной в рамках пакета Comsol Multiphysics версии 5.2, и полуаналитического численного решения модельной задачи, которое в пределах погрешности можно считать точным. Все модели в целом совпадают между собой. Различия (результаты конечно-элементной модели не совпадают с результатами полуаналитической модели и гибридной схемы) наблюдаются вблизи частотного диапазона возбуждения обратных волн, что связано с ограничениями при реализации поглощающих граничных условий (идеально согласованных слоев) в рамках пакета Comsol.

Используя разработанную гибридную численно-аналитическую схему, соискателем проводится исследование резонансных явлений (эффект ловушечных мод) в средах с локальными неоднородностями в *пятой главе*. Производится расчет коэффициента прохождения и резонансных частот рассеяния в волноводах с внутренней эллиптической полостью, упругим включением и рельефной поверхностью. Эффект ловушечных мод проявляется как резонансное блокирование одиночным препятствием падающего волнового поля на определенных частотах, что дает основу для разработки алгоритмов идентификации скрытых дефектов по отраженному полю.

В случае множественных препятствий резонансные частоты совпадают с локальными максимумами коэффициента прохождения. Кроме того в данном случае наблюдаются частотные диапазоны, где наблюдается резонансное блокирование падающего волнового поля. Расчет данных диапазонов и частот соискателем производится на примере последовательно расположенных равноудаленных упругих квадратных включений в параграфе 5.2. Кроме того в рамках данного параграфа приводится модификация гибридной схемы для данных задач.

Шестая глава посвящена решению задач для встроенных волноводов произвольного поперечного сечения (2.5-мерные задачи). В подобных задачах волны распространяются в направлении ортогональном к плоскому поперечному сечению. Геометрия подобных задач позволяет применить преобразование Фурье вдоль направления распространения волн и свести исходную трехмерную краевую задачу к решению плоской задачи относительно поперечного сечения. Для решения плоской задачи применяется гибридная численно-аналитическая схема. В случае акустических волноводов произведен расчет дисперсионных характеристик возбуждаемых волн.

В *заключении* формируются основные результаты диссертационного исследования.

3. Значимость полученных результатов для развития соответствующих отраслей наук

Научная новизна полученных результатов исследования: автором предложено обобщение пленочной модели актуатора на случай круговых накладок, а также установлены границы применимости предложенных моделей актуаторов. Используя данные модели, произведен расчет оптимальных параметров системы пьезоактуатор-упругая подложка. Автором предложен новый метод решения задач дифракции в волноводах с локальными неоднородностями (гибридная численно-аналитическая схема). Используя данную схему, производится расчет собственных частот ловушечных мод, в волноводах с различными препятствиями (полость, выемка, упругое включение), а также определяются зоны запирания и прохождения для систем последовательно расположенных упругих квадратных включений. Разработанный и реализованный метод решения краевых задач для встроенных волноводов, позволяющий рассчитать собственные характеристики вытекающих мод.

Научная значимость и практическая ценность состоит в том, что полученные результаты и разработанные методы могут быть использованы при проектировании и реализации систем неразрушающего контроля, волнового мониторинга целостности конструкций.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается математической строгостью постановки краевых задач линейной теории упругости и электроупругости, а также методов их решения,

сопоставлением с результатами других методов решения, рассматриваемых задач, многие из которых проверялись на эксперименте.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 работах в ведущих рецензируемых журналах и трудах конференций; из них 4 в журналах, включенных в базы данных Web of Science и/или Scopus, и 3 в изданиях из перечня, утверждённого ВАК РФ.

4. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные результаты могут быть использованы при проведении научных исследований в Институте проблем механике РАН, Институте проблем машиностроения РАН, Южном федеральном университете, ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН (ИМСС УрО РАН) и других.

5. Замечания по содержанию диссертации

1. В первой главе приводятся хорошо известные сведения из линейной теории упругости, электроупругости и общей акустики, которые можно было бы сократить, приведя соответствующие ссылки в списке литературы.

2. В параграфе 1.1 приводятся многочисленные граничные условия, используемые в диссертационной работе, однако в большинстве краевых задач рассматривается слой со свободными от напряжений поверхностями, кроме параграфа 2.3, что вводит в заблуждение. В свою очередь данный параграф, хоть и содержит интересные численные расчеты, но перегружен ими.

3. Верификация предлагаемой гибридной численно-аналитической схемы осуществляется путем сопоставления численных результатов. Решение модельной задачи может быть построено на основании решения интегрального уравнения, однако само уравнение, как и способ его решения в диссертации не описывается.

4. В шестой главе не хватает численных результатов, в частности, необходим расчет волновых чисел в случае упругих встроенных волноводов, а также дополнительных расчеты для акустических волноводов.

Указанные замечания не снижают общей научной и практической значимости диссертационной работы и не влияют на ее главные теоретические и практические результаты, выводы и рекомендации.

6. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертация Евдокимова А.А. «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами» является

законченной научно-квалификационной работой, выполненной лично соискателем на актуальную тему. Диссертация содержит новые результаты, проиллюстрированные численными расчетами, аккуратно оформлена и грамотно написана. По каждой главе и в целом по работе сделаны выводы.

Работа соответствует паспорту специальности 01.02.04 – **механика деформируемого твердого тела**, физико-математические науки; областям исследования паспорта специальности, в частности, пунктам 1, 5, 7, 8. Основные научные положения и выводы обоснованы, достоверны, имеют практическую и научную ценность. В публикациях с достаточной полнотой отражены основные положения диссертационной работы. В целом диссертационное исследование полностью отвечает критериям для диссертации, представленной на соискание учёной степени кандидата наук, в т.ч. п. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, А.А. Евдокимов, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.04 – механика деформируемого твердого тела**.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского «12» июля 2018 г., протокол № 4.

Директор НИИМ

Нижегородского университета

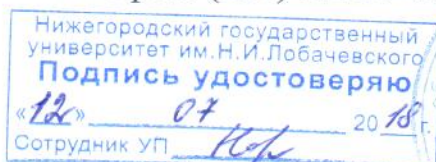
д. ф.-м.н., профессор



Игумнов Леонид Александрович

Почтовый адрес: 603950, г.Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, ННГУ.

Телефон: (831)462-30-03. Веб-сайт: <http://www.unn.ru> E-mail: unn@unn.ru



Ведущий
документовед УП
Новосельцева Н.А.

