ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Евдокимова Александра Александровича «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы исследований. В последнее временя большую популярность набирают системы, использующие распределенную сеть активных пьезосенсоров. Подобные системы, использующие управляемые поверхностные или объемные акустические или упругие волны, позволяют выявлять скрытые дефекты или повреждения в различных конструкциях в ходе их эксплуатации. Данные конструкции традиционно относят к смарт-структурам. При создании смарт-структур требуется разработка эффективных механико-математических моделей процессов возбуждения, распространения и дифракции упругих волн в подобных конструкциях, на что и направлено диссертационное исследование. Аналогичные задачи также актуальны для таких областей науки и техники, как сейсмология, сейсмостойкое строительство, виброзащита, машиностроение и др.

Научная новизна полученных результатов исследования состоит в следующем: соискателем предложена пленочная модель для круговых пьезонакладок на основе разработанной ранее пленочной модели для полосовых актуаторов. Осуществлена оценка применимости традиционных, проверенных на эксперименте, и предлагаемых моделей взаимодействия пьезактуаторов с упругой изотропной подложкой. Проведен расчет оптимальных пар частоты и размера актуатора, позволяющих максимизировать амплитуду зондирующего сигнала. Предложены новые методы численно-аналитического решения краевых задач о дифракции упругих волн на различных локальных препятствиях. Для подобных задач проведен расчет собственных частот ловушечных мод, а также определены зоны запирания-прохождения для систем последовательно расположенных препятствий. Кроме того разработан и реализован метод расчета собственных частот вытекающих мод для погруженных волноводов.

Научная и практическая значимость работы обусловлена разработкой новых моделей, описывающих динамическое взаимодействие волновода с поверхностными активными пьезоэлементами, а также разработкой новых численно-аналитических методов решения краевых задач на основе сопряжения модального разложения решения задачи и его конечно-элементного представления.

Достоверность и обоснованность полученных в ходе исследования результатов обеспечивается математической строгостью постановок и методов решения рассматриваемых краевых задач линейной теории упругости, акустики и электроупругости, а также сопоставлением с результатами, полученными в рамках иных моделей, в том числе проверенных экспериментально.

Общая характеристика работы.

Во **введение** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, приводятся цели и задачи диссертационной работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, указываются работы автора, в которых содержаться основные результаты исследования.

Рассматриваемые в рамках диссертационной работы краевые задачи линейной теории упругости, электроупругости и акустики описаны **в первой главе**. Указаны упрощающие предположения, позволяющие свести связную краевую задачу о динамическом взаимодействии пьезокерамической накладки (цилиндрической или полосовой формы) с упругой изотропной подложкой, к решению интегро-дифференциальных уравнений относительно неизвестных контактных касательных напряжений и смещений. В рамках данных упрощений актуатор фактически рассматривается как тонкая пленка (пленочная модель актуатора).

Во второй главе описывается интегральный подход для решения краевых задач, в рамках которого решение задач об установившихся колебаниях упругого изотропного слоя представляется в виде контурного интеграла от произведения Фурье-символов матрицы Грина и вектора нагрузки. Контур интегрирования почти всюду совпадает с вещественной осью, отклоняясь от неё при обходе вещественных полюсов элементов Фурье-символа матрицы Грина. Расположение данных полюсов в комплексной плоскости в зависимости от частоты подробно исследуется в данной главе.

Решение интегро-дифференциальных уравнений, сформулированных в первой главе, приводятся **в третьей главе**. Интегро-дифференциальные уравнения сводятся к уравнениям Винера-Хопфа относительно контактных

напряжений. Численное решение строится на основе метода Галеркина с различными системами проекторов и базисных функций. Оценка границ применимости моделей, описывающих взаимодействие пьезоактуатора и упругой подложки, осуществляется на основе сопоставления интегральных характеристик (энергии, поступающая в упругой слой от источника). Для сопоставления выбираются упрощенные, технические модели актуатора, заменяющие его воздействие на волновод парой сосредоточенных поверхностных сил, а также конечно-элементная модель исходной задачи. Используя пленочную модель, проведен расчет энергетических характеристик волн, возбуждаемых актуатором. Указываются зоны наилучшего возбуждения, т.е. диапазоны частот и характерных размеров актуатора (полуширина для полосовой и радиус для круговой накладки), позволяющих возбуждать одну доминирующую фундаментальную моду.

В четвертой главе подробно описывается гибридная численно-аналитическая схема решения краевых задач дифракции. Схема формулируется на основе решения модельной задачи для акустического волновода, а затем обобщается на упругий случай. В рамках данной схемы локальное решение вблизи препятствия, дефекта, источника колебаний строится в виде суммы решений вспомогательных конечно-элементных задач. В оставшихся областях волновода решение строится в виде суммы мод с неизвестными коэффициентами, которые определяются исходя из условий равенства смещений или напряжений на стыке областей. Проводится верификация предлагаемой схемы на основе сопоставления результатов, полученных в рамках иных моделей, решения которых можно считать точными.

В пятой главе представлены основные результаты, полученные в рамках гибридной численно-аналитической схемы. Производится расчет коэффициента прохождения для волнового поля, падающего на препятствие или системы препятствий различной природы (эллиптическая полость, упругие включения, расположенные в различных частях волновода, прямоугольные полости), а также собственных частот ловушечных колебаний. Приводится модификация гибридной численно-аналитической схемы на случай волноводов с множественными локальными неоднородностями, разделенными протяженными зонами однородного материала.

В рамках **шестой главы** производится построение решения краевых задач для встроенных волноводов, которые погружены в некоторую внешнюю среду, которую можно считать безграничной в поперечном сечении. Применения преобразование Фурье вдоль направления распространения волн позволяет

свести исходную трехмерную краевую задачу к плоской задаче относительно трансформант Фурье для поперечного сечения, решение которой может быть построены в рамках гибридной численно-аналитической схемы. Для встроенных акустических волноводов представлены расчеты дисперсионных характеристик.

По диссертационной работе имеется ряд **замечаний:**

1. Для осесимметричной задачи контур Γ^{+} совпадает с положительной частью вещественной оси. Замыкание контура для применения теории вычетов и леммы Жордана без привлечения процедуры разворота контура возможно только через мнимую ось. При этом возникает часть контура $\Gamma_i^{\pm}$ по мнимой оси, которую также необходимо учитывать либо в виде комплексных полюсов, либо в непосредственном вычислении интеграла по мнимой оси. Вблизи от источника вклад интеграла по $\Gamma_i^{\pm}$ может быть существенным не только для смещений, но и для потоков энергии. Однако в работе этот момент никак не освещается.
2. В диссертационной работе присутствуют небрежности и опечатки, например: на с. 25, 4 абзац, стоит лишнее слово «можно»; на с. 105, последний абзац, присутствует лишняя частица «не»; на с. 116, 2-й абзац, неверно указан номер рисунка 5.17, когда подразумевается рис. 5.18; на с. 55, первая строка, в знаменателе формулы безразмерной круговой частоты стоит индекс s, но пропущена буква C, соответствующая скорости поперечных волн; обозначение $C_S^{(2)}$ пропущено в трех формулах на с. 101, 3-й абзац.
3. На с. 114, последняя формула для матрицы B содержит ошибку в третьей строке, поскольку в индексе элемента матрицы вместо цифры стоит скобка и самих ненулевых элементов в строке 4, хотя подразумевается 3.
4. Рисунки 3.5, 3.7 и 3.6, 3.8 описывающие энергию, поступающую в свободной слой от полосового (рисунок 3.5) и кругового (рисунок 3.7) пьезоактуаторов, или описывающие доли энергий фундаментальных мод (рисунки 3.6 и 3.8), практически совпадают между собой, хотя и рассчитаны для разных задач. В диссертационном исследовании данный факт не отмечается.

Сделанные замечания носят в основном редакционный характер и ни в коей мере не снижают общую научную и практическую значимость диссертационной работы.

Заключение.

Диссертация Евдокимова А.А. «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным соискателем на актуальную тему. В диссертации содержатся новые результаты, которые иллюстрируются численными расчетами. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в ведущих научных изданиях и апробированы на различных Всероссийских и международных конференциях. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационное исследование «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами» соответствует паспорту специальности 01.02.04 и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям (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.

Официальный оппонент, доктор физико-
математических наук, в.н.с.,
лаборатория математики и механики,
Федеральное государственное бюджетное
учреждении науки «Федеральный
исследовательский центр Южный научный
центр Российской академии наук»

Сыромятников Павел Викторович

Адрес: 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41.
Тел. 8-863-250-98-10. E-mail: syromyatnikov_pv@mail.ru

Подпись Сыромятникова П.В. заверяю,
Ученый секретарь ЮНЦ РАН, к.б.н. _____ Булышева Н.И.