Отзыв

официального оппонента на диссертацию 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.

Актуальность избранной темы.

Целью диссертационной работы является исследование процессов возбуждения, распространения и дифракции упругих колебаний в волноводах, содержащих в себе локальные неоднородности различной природы. Данная тематика является *актуальной*, поскольку результаты подобных исследований могут быть использованы или активно применяются во многих областях науки и техники. Например, при проектировании и реализации систем волнового неразрушающего контроля или систем диагностики состояния производственных объектов, позволяющих обнаруживать дефекты или повреждения в ходе их эксплуатации. Работоспособность подобных систем обеспечивается качественным программным обеспечением, базирующимся на математических моделях происходящих процессов и эффективных методах численного решения возникающих задач. В качестве возбудителей или приемников ультразвуковых колебаний в подобных системах выступают актуаторы, выполненные из пьезокерамики. Для описания динамического взаимодействия пьезоактуаторов на упругою подложку в работе предлагается дальнейшее развитие предложенных ранее пленочных моделей актуаторов. Кроме того в диссертационном исследовании описан новый метод решения задач дифракции волн на локальных неоднородностях (гибридная численно-аналитическая схема). На актуальность и практическую значимость диссертационного исследования и полученных результатов, в частности,

указывает их поддержка со стороны различных государственных фондов и Министерства образования и науки Российской Федерации.

Степень обоснованности научных положений и достоверности полученных результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного математического аппарата механики сплошных сред, корректными постановками задач теории упругости в плоской постановке и аккуратной компьютерной реализацией численных методов. Все математические модели прошли проверку сравнением с частными случаями, для которых известны решения. *Научная и практическая значимость* определяется необходимостью разработки и реализации математических и компьютерных моделей процессов возбуждения, распространения и дифракции упругих волн в протяженных структурах с неоднородностями в приложении к проблемам неразрушающего контроля и волнового мониторинга состояния конструкций (в зарубежных источниках Structural Health Monitoring (SHM)). Новый полуаналитический метод решения задач дифракции, основанный на сопряжении численного решения вблизи препятствия и модального разложения в однородной зоне волновода, также представляет большой теоретический интерес.

Содержание и новизна полученных результатов

Во введение соискателем дается достаточно подробный обзор имеющихся работ по теме диссертации, приводятся существующие подходы к моделированию взаимодействия актуатора с упругой подложкой (технические точечно-силовые модели, численные методы решения соответствующих задач через конечно-элементное моделирование (МКЭ) или гранично-элементное моделирование (МГЭ) и др.). Большое внимание уделено обзору методов решения задач дифракции как классических (МГЭ, МКЭ, метод конечных

разностей), так и их модификаций, призванных уменьшить вычислительные затраты, а также упоминаются некоторые из гибридных подходов. Формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту, указывается новизна и практическая значимость, а также обосновывается достоверность полученных результатов.

В первой главе излагаются основные положения динамической теории упругости и электроупругости (уравнения состояния и движения), граничные условия, применяемые в рамках диссертации. Исходные уравнения, описывающие механические и электрические поля внутри пьезоактуатора, достаточно сложны, поэтому при выводе конечных краевых задач о взаимодействии актуатора с упругой подложкой накладываются дополнительные ограничения, позволяющие перейти к решению задач для поперечного сечения волновода. С учетом данных предположений актуатор рассматривается как тонкая гибкая пленка.

Во второй главе на основе интегрального подхода строится решение краевых задач, описывающих колебания упругого изотропного слоя под действием поверхностной нагрузки,. В рамках данного подхода выписываются основные формулы для расчета дисперсионных и энергетических характеристик возникающих волновых полей.

В третьей главе диссертации на основе полученных интегральных представлений решения краевых задач для упругого слоя (в виде свертки матрицы Грина и поверхностных напряжений) строятся системы интегро-дифференциальных уравнений, позволяющие рассчитать компоненты смещений и напряжений в зоне контакта актуатора с волноводом. Системы интегро-дифференциальных уравнений сводятся к решению интегральных

уравнений Винера-Хопфа относительно касательных напряжений, решения которых строится численно в рамках метода Галеркина. Полученное решение связной задачи о динамическом взаимодействии пьезоактуатора с упругой подложкой используется для расчета оптимальных режимов работы актуатора, позволяющих максимизировать амплитуду зондирующего сигнала, а также для расчета сочетаний пар частоты и характерного размера актуатора (полуширина или радиус накладки), позволяющих возбуждать одну доминирующую фундаментальную симметричную или антисимметричную волну Лэмба. Интересным в данном случае является то, что при определенных частотах и длинах подобный эффект наблюдается и в многомодовом высокочастотном диапазоне.

Четвертая и пятая главы посвящены описанию гибридной численно-аналитической схемы и решению на её основе задач дифракции. В качестве модельной рассматривается задач о дифракции акустической или упругой волны на поверхностном препятствии, выраженном в виде нарушения непрерывности граничных условий. В рамках гибридной схемы решение модельной задачи представимо в виде нескольких функций. Первая глобальная функция задана в зонах однородного материала, не содержащего в себе препятствия и представима в виде суммы возбуждаемых на данной частоте мод с некоторыми неизвестными коэффициентами. Вторая локальная функция определена в зоне неоднородности и имеет вид суммы базисных конечно-элементных решений с аналогичными коэффициентами. Неизвестные коэффициенты определяются исходя из условий непрерывности волновых полей.

Модельная задача также имеет полуаналитическое решение, основанное на численном решении интегрального уравнения относительно неизвестных напряжений в зоне неоднородности. В пределах рассматриваемой погрешности данное решение можно считать точным. Еще одно решение модельной задачи может быть получено на основе метода конечных элементов (МКЭ) со

специальными поглощающими граничными условиями, например, в форме идеально согласованных слоев. Полученные результаты от всех трех методов совпадают между собой вплоть до диапазонов возбуждения обратных волн, где МКЭ отличается от результатов других моделей, что связано с реализацией МКЭ с идеально согласованными слоями в пакете Comsol.

Основные численные результаты, полученные в рамках гибридной численно-аналитической схемы, приводятся в пятой главе. Рассчитаны коэффициенты прохождения и собственные частоты ловушечных мод (колебания, которые локализуются вблизи препятствия) для задач дифракции волнового поля на различных неоднородностях (упругие квадратные включения, прямоугольная выемка, эллиптическая полость, волноводы с ребрами жесткости).

В диссертации также рассматриваются задачи, в которых препятствие является протяженным и может рассматриваться как волновод (шестая глава), взаимодействующий с окружающей акустической или упругой средой. Подобные задачи возникают при диагностике заглубленных трубопроводов или состояния рельсового полотна. Интерес в данном случае представляет расчет дисперсионных характеристик и собственных форм бегущих волн в подобных протяженных волноводах, которые приводятся в диссертационной работе. На получение которых нацелены методы, разрабатываемые в диссертационной работе.

Замечания.

По работе имеются замечания:

1. В диссертации не указаны параметры конечно-элементных сеток при проведении расчетов и не приводятся исследование сходимости с увеличением количества конечных элементов, что не позволяет в полной мере оценить преимущества гибридной численно-аналитической схемы. Кроме того в диссертации содержится

достаточно большое количество численных результатов, полученных в рамках МКЭ, для широких диапазонов частот, однако, не указывается, изменение сетки с увеличением частоты.

2. В работе не содержится четкого математического обоснования выбора количества базисных решений (количество слагаемых), включаемых в разложение в рамках гибридной схемы.
3. Анализ зависимости энергии, поступающей в среду от источника, и её распределения по фундаментальным модам в зависимости от частоты и размеров актуатора приводится лишь для одного сорта пьезокерамики. Интересно было бы увидеть аналогичные графики для других сортов.
4. Не указана степень аппроксимирующих полиномов, используемых в рамках МКЭ-решений.

Заключение.

Указанные замечания не затрагивают основные результаты и их можно рассматривать как рекомендации для проведения дальнейших исследований.

Автореферат правильно и в полной мере отражает содержания диссертации. Основные результаты исследования опубликованы в 8 работах в рецензируемых журналах и трудах конференций; из них 3 в изданиях из перечня, утверждённого ВАК РФ (переводные версии 2 журналов индексируются в базах данных Web of Science и Scopus), еще две в трудах конференции, индексируемых в базе данных Scopus.

Диссертация является завершенным исследованием высокого научного уровня. Работа содержит новые результаты, вносящие вклад в развитие методов решения задач механики сплошных сред и волновой динамики. На основании вышеизложенного считаю, что диссертационное исследование «Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами» **удовлетворяет** требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям («Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а А.А. Евдокимов **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук, доцент,
заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Донской государственный
технический университет»,
344000, Россия, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону,
пл. Гагарина, д. 1,
+7 (863) 273-85-66
тел. 8-863-2381509 (раб.), 8-904-5041638 (моб.)
e-mail: solovievarc@gmail.com

«17» 08 2018г. Соловьев Аркадий Николаевич

Подпись А.Н. Соловьева удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета ДГТУ В.Н. Анисимов