

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу
Грековой Елены Федоровны
«Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»**

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена построению математических моделей и изучению волновой динамики континуальных сред сложной структуры, обладающих свойствами акустических метаматериалов – запрещенными зонами частот, где гармоническая волна в материале не распространяется, и падающими участками дисперсионных кривых, соответствующими зонам аномального преломления. Эти зоны соответствуют отрицательным эффективным инерционным и (или) упругим характеристикам. Акустические метаматериалы широко применяются как поглотители звука в строительной, судовой, космической, авиационной и других отраслях промышленности. Также они используются для улучшения передачи и точности направления акустической волны, что важно при ультразвуковых исследованиях. Таким образом, цель и задачи диссертации являются актуальными с точки зрения теории и практики.

Обоснованность и достоверность научных положений обеспечиваются корректным использованием законов механики и математических методов, подтверждаются сравнением теоретических результатов с численными, а также экспериментальными свидетельствами.

Научная новизна. Поставленная цель работы – развитие теории континуумов сложной структуры, в том числе с поворотными степенями свободы, служащих моделями акустических метаматериалов, при помощи континуально-феноменологического подхода, достигнута автором путем получения основных результатов работы: 1) предложено понятие и развита

теория упругих «редуцированных сред», состоящих из взаимодействующих субконтинуумов, деформация одного из которых не вызывает реакции в среде, показано, что такие среды могут являться акустическими метаматериалами; 2) показано, как, управляя взаимосвязью субконтинуумов или внешним воздействием, можно изменять рабочие зоны метаматериала; 3) показано, что диссипация в линейном случае приводит к существованию решения в виде бегущей волны и в части бывших запрещенных зон может приводить к возникновению зон аномального преломления или к уменьшению затухания колебаний; 4) предложены различные модели редуцированных сред Коссера, в том числе, с учетом нелинейности, анизотропии, диссипации для описания зернистых, блоковых, композитных, сыпучих консолидированных сред, являющихся акустическими метаматериалами. Их рабочими зонами можно управлять при помощи внешнего воздействия или предварительного напряженно-деформированного состояния; 5) получена функция Грина для сосредоточенных гармонических нагрузок в неограниченной редуцированной линейной изотропной упругой среде Коссера, демонстрирующая возможность частичной локализации решения и резонансных явлений; 6) найден механизм неустойчивости редуцированной изотропной среды Коссера при всестороннем растяжении, отсутствующий в классической среде; 7) предложены модели и проведен дисперсионный анализ простейших редуцированных гироконтинуумов, пригодных в качестве моделей для акустических метаматериалов с гироскопическими элементами и магнитоупругих метаматериалов. Все результаты **являются новыми и получены автором самостоятельно.**

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть применимы к описанию динамики зернистых, блоковых, композитных сред, сред с контрастами свойств, они могут быть востребованы в

ротационной сейсмологии, в сейсморазведке, а также при разработке гироскопических и магнитоупругих акустических метаматериалов.

Структура и содержание диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 401 страницу, 74 рисунка, список литературы включает 327 наименований.

Во введении кратко изложены основные понятия, цель и задачи диссертационной работы, методы исследования, сведения о структуре диссертации, апробации работы, ее теоретической и практической значимости, основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе содержится подробный аналитический обзор, обоснование цели и задач диссертационной работы.

Во второй главе введено понятие редуцированных сред, показано, что линейная изотропная редуцированная среда при некоторых условиях является акустическим метаматериалом, а добавление диссипации к какой-либо упругой связи по типу Фойхта – Кельвина приводит к изменению свойств метаматериала, обеспечивая существование решений в виде бегущих затухающих волн и нередко приводя к возникновению зон аномального преломления в тех областях частот, где в упругом случае бегущие волны отсутствовали. Рассмотрены примеры известных сред («масса-в-массе», линейная редуцированная среда Коссера) и предложены другие акустические метаматериалы с поворотными степенями свободы.

Третья глава посвящена моделям и динамическим свойствам редуцированных сред Коссера – акустических метаматериалов с поворотными степенями свободы без больших скоростей вращения. В них не производится работы на градиенте поворота частиц. Предложена полная нелинейная теория упругой редуцированной среды Коссера. Тензор напряжений в ней не обладает симметрией, но тензор моментных напряжений отсутствует. Значимость поворотных степеней свободы при отсутствии внешних объемных моментов проявляется в динамике и

свойствах устойчивости материала. Так, изотропная нелинейная редуцированная упругая среда Коссера с выпуклой энергетической характеристикой, удовлетворяющей определенному условию, становится неустойчивой под действием достаточно большого всестороннего растяжения. Данный эффект отсутствует в классических средах, но наблюдается экспериментально в консолидированных сыпучих и зернистых материалах. В области устойчивости среда представляет собой акустический метаматериал по отношению к поперечным волнам, свойства которого можно контролировать при помощи предварительного напряженного состояния. Эффективные уравнения для трансляционных степеней свободы такой среды, в которых учтено влияние микроповоротов, оказываются аналогичными уравнениям некоторой классической изотропной упругой среды с памятью. Также получена функция Грина для линейной неограниченной редуцированной изотропной упругой среды Коссера, подвергнутой действию гармонических сосредоточенных силы и момента. Если частота воздействий находится в зоне, запрещенной для поперечных волн, часть возмущения локализуется у источника. Предложены модели редуцированных полной среды Коссера и среды Коссера со стесненным вращением, учитывающие локальную анизотропию и диссипацию. Малая диссипация приводит к существованию зон аномального преломления сильно затухающих колебаний, при этом с ростом малой диссипации затухание может уменьшаться в некоторой области частот. Полученные асимптотические соотношения для дисперсионных зависимостей редуцированной среды Коссера, подвергнутой действию следящего диссипативного момента, также применимы в случае волн поляризации в неполярных диэлектриках.

В четвертой главе диссертации предложены модели редуцированной среды Кельвина (состоящей из частиц, быстро вращающихся вокруг своих осей симметрии, не вызывая напряжений в среде) и редуцированной

гиростатической среды, также обладающие свойствами акустических метаматериалов. В этих средах упругая энергия не зависит от градиента поворота частиц. Поскольку уравнения среды Кельвина аналогичны уравнениям упругих непроводящих ферромагнетиков вблизи магнитного насыщения, результаты данной главы применимы и к акустическим метаматериалам на основе гироскопических элементов, разрабатываемых в последние годы, и к магнитоупругим акустическим метаматериалам. Получены дисперсионные соотношения, показано, что в этих средах поперечные волны обладают эллиптической или круговой поляризацией, если волновой вектор не ортогонален оси частиц. Одна из дисперсионных ветвей обладает запрещенной зоной. При действии внешнего следящего момента свойства метаматериала могут качественно изменяться, могут возникать падающие участки дисперсионных кривых. Дисперсионное поведение весьма сложно и зависит от внешнего воздействия и направления распространения волны.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Апробация. Основные положения диссертации опубликованы в уважаемых научных отечественных и иностранных изданиях: 28 публикаций, индексируемых в Scopus, в том числе 13 без соавторов, 9 в журналах квартиля Q1, 4 в журналах квартиля Q2. Результаты работы докладывались на известных научных семинарах, более чем на 50 российских и международных конференциях.

Замечания:

1. В работе приводятся дисперсионные зависимости нескольких типов волн, при этом дисперсия в различных частотных диапазонах оценивается как малая или значительная, но нигде автор не анализирует характер дисперсии: нормальная она или аномальная.

2. Много внимания в работе заслуженно уделяется анализу зон аномального преломления волн (это те зоны, в которых групповые скорости имеют отрицательное значение, т.е. отрицательное направление). К сожалению, при этом не говорится о направлении фазовой скорости. Разнонаправленность фазовых и групповых скоростей характерна для так называемых «обратных волн» – любопытного феномена, предсказанного Артуром Шустером и впервые описанного Горацием Лэмбом в 1904 году, т.е. задолго до открытия метаматериалов с их аномальным преломлением.
3. Нечасто, но встречается в тексте жаргонная терминология, например: «существование бегущего решения» (стр. 99, 100); «бегущее затухающее решение» (стр. 104, 127); «выпуклая энергия» (стр.17 автореферата).

Отмеченные недостатки не снижают качество исследования, не влияют на основные диссертации.

Заключение. Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Достигнутые результаты представляют собой разработку нового научного направления в рамках теории сплошных сред сложной структуры – теории редуцированных сред, имеют теоретическое и практическое значение и перспективу приложений в науке и промышленности. Работу характеризуют последовательность и ясность. Выводы обоснованы. Автореферат правильно и полно описывает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013, № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Грекова Елена Федоровна, заслуживает присуждения ученой

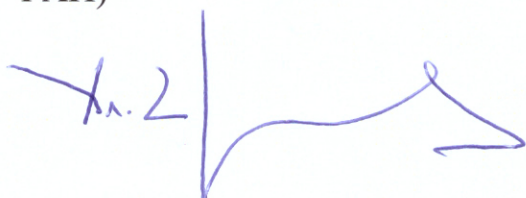
степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

(1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела),

профессор, директор Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН)



Ерофеев Владимир Иванович

29.11.2023

Подпись Ерофеева Владимира Ивановича заверяю:

Ученый секретарь ИПМ РАН,

к.т.н., доцент



Е.А. Мотова

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН).

Адрес: 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85.

Тел.: +7(831) 432-03-00; эл.почта: imsh@mts-nn.ru

Сайт: <http://ipmran.ru/>