

О Т З Ы В

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

В диссертационной работе Грековой Е.Ф. рассмотрены так называемые редуцированные среды – среды сложной структуры особого вида, которые обладают специфическими волновыми свойствами и могут служить моделями зернистых сред, сред блочной структуры, композитов с жесткими включениями, метаматериалов с гироскопическими элементами и магнитоупругих метаматериалов. Цель работы – развитие теории акустических метаматериалов, в том числе теории континуумов с вращательными степенями свободы, при помощи математических методов механики сплошной среды. Под акустическими метаматериалами понимаются среды, обладающие запрещенными зонами частот или падающими участками на дисперсионных кривых.

Данная цель достигается путем решения следующих задач:

- 1) введено понятие редуцированной упругой линейной среды, состоящей из двух субконтинуумов, от деформации одного из которых не зависит упругая энергия, и показано, при каких условиях среда проявляет свойства акустического метаматериала;
- 2) показано, как взаимосвязь субконтинуумов и внешнее воздействие влияют на рабочие зоны метаматериала;
- 3) исследовано влияние диссипации на свойства метаматериала, во многих случаях приводящей к возникновению падающих участков дисперсионных кривых и уменьшающей затухание волн в пределах зон с большим поглощением;
- 4) предложены различные модели редуцированных сред Коссера для зернистых, блочных сред, композитов с включениями, в том числе нелинейные и анизотропные, обладающие свойствами акустических метаматериалов, которые можно контролировать при помощи предварительного напряженного состояния, диссипации и внешних воздействий;
- 5) получена функция Грина для безграничной упругой линейной изотропной среды Коссера под действием гармонических сосредоточенных силы и момента, которая свидетельствует о возможности локализованных и резонансных решений;
- 6) найден новый механизм неустойчивости для данной среды;
- 7) предложены модели интеллектуальных редуцированных гироконтинуумов (сред с большими скоростями вращения частиц) со свойствами акустических метаматериалов, и проведен их дисперсионный анализ.

Актуальность темы исследования обусловлена потребностью в разработке перспективных искусственных материалов с желаемыми динамическими свойствами и предсказании поведения геосред, консолидированных сыпучих и зернистых материалов, композитов при динамических нагрузках. Результаты работы важны для сейсморазведки,

добывающей и обрабатывающей промышленности, ультразвуковых исследований, технологий виброизоляции и фокусировки звука.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении кратко описаны объект, цель исследования, поставленные задачи, обсуждается актуальность, структура работы, метод исследования, результаты, выносимые на защиту, и их новизна, достоверность и обоснованность результатов, теоретическая и практическая значимость, апробация работы, личный вклад соискателя.

В первой главе обсуждаются основные понятия, представлен аналитический обзор исследований по тематике работы, из которого логически вытекают цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе вводится понятие редуцированных линейных упругих и вязкоупругих сред, состоящих из двух взаимосвязанных субконтинуумов, причем градиент обобщенного смещения одного из них не вызывает реакции континуума в целом. Показано, что при определенных условиях такие среды проявляют свойства акустических метаматериалов, то есть обладают запрещенными зонами частот и/или падающими участками дисперсионных кривых. Приведены примеры редуцированных сред, как известные из литературы, так и предложенные автором. Показано, что взаимное расположение парциальных частот субконтинуумов и параметры взаимосвязи определяют качественные свойства метаматериала. Установлено, что диссипация существенно меняет характер волнового движения, обеспечивая бегущее решение, приводит к возникновению падающих участков дисперсионных кривых, и что в некоторых случаях при ее возрастании волна затухает медленнее.

В третьей главе введено понятие нелинейной упругой редуцированной среды Коссера, в которой упругая энергия не зависит от градиента поворота частиц, и получены различные модели линеаризованных редуцированных сред Коссера, применимые для описания зернистых, блочных, консолидированных сыпучих сред, композитов с включениями и иных материалов, где важны вращательные степени свободы, но нет взаимодействия, стремящегося уменьшить относительный поворот частиц. В том числе предлагаются модели, описывающие локальную анизотропию, которая проявляется лишь на определенных масштабах, и модель редуцированной псевдосреды Коссера. Эти среды также являются акустическими метаматериалами. Исследованы процессы распространения волн в данных средах. Для изотропного случая решена задача о действии сосредоточенных гармонических силы и момента в безграничной среде. Показана возможность локализации части решения. Найден новый механизм неустойчивости материала, отсутствующий в классических средах, о существовании которого свидетельствуют известные экспериментальные данные. Проанализировано влияние диссипативных процессов. Результаты эксперимента о распространении волн в когезивном порошке, выполненного коллегами соискателя, воспроизведены при помощи экспериментальной установки, разработанной в сотрудничестве с ними. Показано, что интерпретация результатов в рамках

упругой редуцированной модели Коссера с локальной анизотропией хорошо согласуется с экспериментом.

Четвертая глава посвящена моделям редуцированных гироконтинуумов – среды Кельвина, состоящей из осесимметричных частиц, быстро вращающихся вокруг своей оси, и простейшей гиросtatической среды, состоящей из «контейнеров» с быстро вращающимися гиростатами. В обеих средах не учитывается реакция на градиент поворота осей частиц или роторов. Простейшие модели таких сред в линейном случае обладают свойствами акустических метаматериалов и могут быть использованы для описания разрабатываемых в последние годы метаматериалов на основе гироскопических элементов и магнитоупругих метаматериалов. Получены дисперсионные соотношения для гармонических волн, большинство из которых обладает эллиптически частотно-зависимой поляризацией. Полученные соотношения носят весьма сложный характер. Показано, как их параметрами, в том числе расположением рабочих зон, можно управлять при помощи внешнего следящего момента.

В заключении сделаны общие выводы по работе, приведены основные результаты.

Общая оценка диссертационной работы.

В диссертации Грековой Е.Ф. развито новое научное направление – теория редуцированных сплошных сред. При помощи математических моделей таких сред можно описывать акустические метаматериалы различной природы, они дают представление о пути разработки метаматериалов с желаемыми динамическими свойствами и управления ими. Проанализировано влияние параметров взаимосвязи субконтинуумов, их парциальных частот, анизотропии и диссипации на свойства метаматериала. Для описания зернистых, блочных, консолидированных сыпучих сред, композитов с включениями предложены модели упругих и вязкоупругих редуцированных сред Коссера с учетом нелинейности и анизотропии, при малых колебаниях проявляющие свойства акустических метаматериалов. Показано, как управлять свойствами данных метаматериалов при помощи предварительного напряженного состояния и внешних воздействий. Для изотропной среды с выпуклой упругой энергией найден новый механизм неустойчивости при всестороннем растяжении, отсутствующий в классических средах, но наблюдаемый на практике в зернистых материалах. Получена функция Грина для изотропной упругой неограниченной редуцированной среды Коссера под действием сосредоточенных гармонических нагрузок, показана возможность локализации части решения и резонансов на определенных частотах. Показано, что волна Рэлея в этой среде обладает высокочастотной ветвью с большими фазовыми скоростями и запрещенной зоной. Проанализировано влияние диссипации, которая превращает часть или всю запрещенную зону в падающий участок дисперсионной кривой и способствует уменьшению затухания колебаний в этой зоне. Построены модели редуцированных гироконтинуумов и проведен их дисперсионный анализ при наличии внешнего следящего момента. Предлагаемые модели можно применять при описании и разработке умных акустических гироскопических и магнитоупругих метаматериалов.

Таким образом, диссертационную работу Грековой Е.Ф. можно квалифицировать как завершенное научное исследование. Полученные в работе результаты дают новые представления о динамических свойствах акустических метаматериалов и способах их

разработки, о поведении сложных сред с вращательными степенями свободы с неупорядоченной ориентацией частиц, включая блочные, зернистые среды, геосреды, консолидированные порошки, композиты с жесткими включениями, акустические гироскопические и магнитоупругие метаматериалы. Разработанная теория открывает возможности перспективных исследований в рамках теории редуцированных сред: поиска новых акустических метаматериалов с вариативными и управляемыми волновыми свойствами, в том числе хиральных и магнитоупругих, анализа качественных и количественных характеристик зернистых и композитных сред при помощи акустических волн, решения динамических задач ротационной сейсмологии и сейсморазведки и др.

По тексту диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Лагранжиан системы уравнений (2.1) определяется через пять тензоров коэффициентов упругости среды и три тензора инерционных характеристик. В результате получилась сложная обобщенная модель, требующая рутинных вычислений при анализе, которая во многих частных случаях при определенном задании этих тензоров приводит к известным моделям редуцированных континуумов. Почему бы не включить в лагранжиан еще всего один тензор, чтобы учесть квадратичную зависимость упругой энергии от градиента ∇q_0 ? Тогда в общую схему исследования добавятся модели, учитывающие моментные взаимодействия частиц метаматериала. Насколько более сложным окажется анализ такой модели? Существенно ли изменятся основные результаты, касающиеся наличия запрещенных зон и падающих участков дисперсионных кривых?
2. Модель пластической редуцированной среды Коссера описана в диссертации чересчур кратко. Не ясно, полна ли она в смысле совпадения числа неизвестных функций и числа уравнений. Удовлетворяет ли она термодинамическому принципу положительности пластической диссипации? Судя по условию пластичности (3.435), невозможно перевести связный сыпучий материал из упругого состояния в состояние пластического течения при одноосном сжатии, когда $\sigma_1 < 0$, а $\sigma_3 = 0$. Хотя, казалось бы, на практике это осуществимо. В плоской задаче теории идеальной пластичности линии скольжения появляются как следствие самих уравнений. Выполняется ли аналогичное свойство в рамках предлагаемой модели?
3. Описание численного эксперимента в разделе 3.5.6.3 также чрезмерно лаконично. Не ясно, как учитывалось в расчетной схеме метода дискретных элементов взаимодействие частиц порошка, поэтому невозможно понять, какое отношение результаты расчетов имеют к модели редуцированного континуума Коссера и почему они соответствуют именно этой модели из всего многообразия моделей редуцированных сред, рассмотренных в диссертации.

Приведенные замечания не снижают научной ценности и общей высокой оценки диссертационной работы, и могут рассматриваться как рекомендации к дальнейшему развитию исследований. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, имеют высокую степень обоснованности и достоверности, докладывались более чем на 50 конференциях в России и за рубежом, а также на

авторитетных научных семинарах. Работа по теме диссертации поддержана в рамках отечественных и международных проектов. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов» соответствует требованиям пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, Грекова Елена Федоровна, достойна присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник, заведующий отделом вычислительной механики деформируемых сред Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, научная специальность:

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

В. Садов

Садовский Владимир Михайлович

« 15 » ноября 2023 г.

Подпись Владимира Михайловича Садовского удостоверяю:

Ученый секретарь ИВМ СО РАН
к.ф.-м.н.



А.В. Вяткин

А.В. Вяткин

660036 Красноярск, Академгородок, 50/44, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН) – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Тел. +7 (391) 243-27-56, sek@icm.krasn.ru