

Отзыв

официального оппонента Шоркина Владимира Сергеевича на диссертацию Грековой Елены Федоровны, выполненную на тему «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Елены Федоровны Грековой посвящена решению проблемы выявления динамических свойств акустических материалов с помощью определения их реакции на действие гармонических нагрузок методами моделирования в рамках механики деформируемого твердого тела искусственных композитов сложной структуры со специфическими свойствами.

Комплекс решений рассмотренных в диссертации задач позволяет говорить о том, что автором разработаны и представлены теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела, которое служит основой нового научного направления.

Актуальность темы диссертации. Прогресс в самых разных отраслях промышленности и областях жизнедеятельности человека в настоящее время обусловлен успешными и экономичными разработкой и созданием новых функциональных материалов с оригинальными, отсутствующими и несовместимыми у их естественных аналогов свойствами. Добиться появления таких свойств можно путем создания у материалов специальной заранее запланированной микроструктуры. Наличие особых микросвойств у данных материалов обеспечивает в условиях эксплуатации требуемые оригинальные макросвойства. В связи с этим актуальным является создание математических моделей, которые отражают на макроуровне наличие специальных микросвойств материала сложной структуры. Такие модели создаются в рамках механики деформируемого твердого тела. Свойства материала отражаются в наборах кинематических характеристик, используемых в модели, и материальных характеристик – параметров, устанавливающих связь изменений кинематических характеристик с изменениями внутренней энергии материала. К числу таких моделей относятся континуумы сложной структуры, в том числе с поворотными степенями свободы, обладающие свойствами акустических метаматериалов – микрополярные среды без больших скоростей вращения, гироконтинуумы, редуцированные континуумы. Степень соответствия свойств сплошных сред, предсказанных существующими и новыми континуальными моделями, реальным свойствам сложных материалов определяется точностью отражения моделью микросвойств материалов. Одной из простейших и дешевых технологий создания композиционных материалов со специфическими свойствами, определяемыми их функциональным назначением, является насыщение однородного материала-матрицы, обладающего одними материальными характеристиками, микрочастицами другого материала с другими параметрами, так что микрочастицы взаимодействуют между собой лишь опосредованно, через материал матрицы. Моделями таких материалов могут служить предложенные соискателем редуцированные среды. Актуальность применения данных материалов в промышленности объясняется их специфическими динамическими свойствами – способностью непропускания волн определенного диапазона частот или наличием падающего участка дисперсионной кривой.

Ввиду сказанного представляется целесообразным развитие теории континуумов сложной структуры, обладающих свойствами акустических метаматериалов. Это соответствует теме диссертации, которая посвящена исследованию динамических свойств редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов, при помощи феноменологических методов механики сплошной среды. Достижению данной цели служит решение поставленных автором диссертации задач, которые автор исследует, доказывая при этом

адекватность рассматриваемых моделей реальным материалам. Таким образом, **тема диссертации является актуальной** как для промышленности, так и развития науки.

Целью диссертационной работы ее автор выбрала решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела, служащее основой нового научного направления – развитие теории редуцированных упругих и вязкоупругих сред различной природы, обладающих свойствами акустических метаматериалов, при помощи феноменологических методов механики сплошной среды.

Для достижения этой цели были поставлен и решен ряд задач, в которых предложен класс континуумов, демонстрирующих свойства акустических метаматериалов, в том числе континуумов с поворотными степенями свободы:

- построены континуальные модели с поворотными степенями свободы для зернистых, блоковых, консолидированных сыпучих сред и композитов с жесткими включениями, в которых нет упорядоченной структуры поворотов, обладающие свойствами акустических метаматериалов, в том числе учитывающие нелинейность, произвольные внешние нагрузки, локальную и иную анизотропию, диссипацию;

- предложены модели среды Кельвина или иного гироконтинуума, обладающие свойствами акустических метаматериалов;

- определено влияние параметров континуума (свойств симметрии, упругих, диссипативных и инерционных констант) на свойства дисперсионных соотношений метаматериала для различных типов волн;

- найдены особенности динамики и устойчивости данных сред, зависимость волновых свойств этих континуумов от диссипативных параметров и параметров анизотропии, предварительного напряженного состояния;

- исследовано влияние параметров континуума на дисперсионные соотношения и возможность управления рабочими зонами метаматериала при помощи внешней нагрузки.

В работе использованы **теоретические методы исследования**, опирающиеся на фундаментальные законы механики. Кроме того, **использованы результаты экспериментов**, как **собственных**, полученных на сконструированной и построенной для этой цели (в соавторстве) экспериментальной установке, так и результатов экспериментов **других авторов**.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация изложена на 401 странице машинописного текста. Она состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, который содержит ссылки на 327 работ отечественных и зарубежных авторов. Проводимые рассуждения и полученные результаты иллюстрируются 74 рисунками (27 – во второй главе, 36 – в третьей главе и 11 – в четвертой главе).

Краткий анализ содержания.

Во **введении** автор представил аннотацию, в которой отмечает, что в диссертации рассмотрены континуумы сложной структуры, которые могут служить моделью акустических метаматериалов. В этом разделе обосновывается **актуальность** темы диссертации, рассматривается **степень ее проработанности**.

Здесь же рассмотрены структура работы, указаны цель работы и решаемые в ней задачи, отмечены выносимые на защиту результаты, теоретическая и практическая значимость работы, метод исследования, достоверность и обоснованность результатов, сказано, как проведена апробация работы. Кроме того отмечено, что результаты исследований отражены в 28 работах, индексируемых в Scopus и/или Web of Science. Из них 9 работ в квартиле Q1, четыре работы в квартиле Q2 по рейтингу Scopus. Здесь же охарактеризован личный вклад автора в опубликованные работы.

В первой главе представлен аналитический обзор по теме диссертации, в котором описываются акустические метаматериалы. Здесь выявлена необходимость модификации микрополярной теории для описания зернистых и блоковых сред. Показана роль поворотных степеней свободы в динамических процессах и перестройке структуры

геосред и сыпучих материалов, анализируются существующие модели акустических метаматериалов. Из обзора следует, что моделирование акустических метаматериалов и различных сред с микроструктурой, особенно с поворотными степенями свободы, является актуальной областью исследований, важной в практическом и теоретическом отношении. При этом внимание акцентировано на особой микрополярной среде без больших скоростей вращения – редуцированной упругой среде Коссера, а также на среде с большими скоростями вращения частиц – среде Кельвина, и на вязкоупругих микрополярных средах. Отмечено, что, несмотря на достигнутый прогресс, в данной области остаются нерешенные задачи. Поэтому разработка моделей Коссера без больших скоростей вращения и гироконтинуумов, обладающих свойствами акустических метаматериалов, представляется актуальной задачей.

Результаты анализа обзора позволили сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены общие закономерности поведения линейных упругих и вязкоупругих редуцированных сред произвольной природы. В предисловии отмечено, что существует мало работ, в которых предлагается класс континуумов, проявляющих свойства метаматериалов. Их общая черта – зависимость упругой энергии от некоторой микродеформации и отсутствие зависимости от ее дивергенции. В данной главе предложен другой класс сложных сплошных сред с тем же свойством, часть из которых является к тому же дважды отрицательными метаматериалами в иных областях частот. Это редуцированные континуумы. Для их описания сначала рассматривается упругий линейный континуум произвольной природы, подчиняющийся уравнениям Лагранжа. Среда состоит из двух субконтинуумов — несущего континуума и распределенного динамического гасителя. Упругая энергия континуума не зависит от градиента обобщенной координаты динамического гасителя, что отражает отсутствие непосредственного взаимодействия его частиц.

Примерами редуцированных континуумов могут служить широко используемая модель акустического метаматериала «масса в массе», а также упругая изотропная линейная редуцированная среда Коссера, в которой, помимо реакции на градиенты перемещений, связанной с параметрами Ламе, присутствует антисимметричная часть тензора напряжений – реакция на разность микроповорота частиц и макropоворота - вихревой деформации окрестности. Рассмотрена также особая редуцированная гиротропная среда, каждый из субконтинуумов которой обладает изотропными характеристиками, но параметр взаимосвязи между континуумами при отражении меняет знак. Рассмотрены редуцированные среды, в которых к существующим упругим связям добавляется линейная диссипация типа Кельвина–Фойгта. Ищутся гармонические решения уравнений динамики, отвечающих линейным моделям рассматриваемых сред. Показано, что континуумы, уравнения которых описываются данной схемой, при определенных требованиях к материальным характеристикам обладают запрещенными зонами частот или зонами аномального преломления (падающими участками дисперсионных кривых), то есть являются моделями акустических метаматериалов.

В третьей главе рассмотрены континуальные модели с поворотными степенями свободы для зернистых, блоковых, консолидированных сыпучих сред и композитов с жесткими включениями, в которых нет упорядоченной структуры поворотов. В роли несущего континуума выступают трансляционные степени свободы, в роли динамического гасителя — поворотные. В качестве моделей предложены редуцированные среды Коссера различного типа.

В круг рассмотренных явлений введены нелинейные определяющие уравнения, устойчивость по отношению к всестороннему растяжению и сжатию, особенности волны Рэлея, реакция упругой изотропной среды на сосредоточенную гармоническую нагрузку, которая свидетельствует о локализации части решения для определенного диапазона частот, анизотропия различного типа. В этой главе получены уравнения для различных

редуцированных упругих сред Коссера и проведена их линейризация для различных вариантов симметрии среды и предварительного напряженного состояния.

Получены и исследованы аналитически дисперсионные соотношения для редуцированных сред Коссера с анизотропной связью между разными типами деформации, со стесненным вращением, с диссипацией.

Исследовано асимптотическое поведение для малого параметра диссипации и вблизи характеристических частот. Показано, что для определенных типов волн данные среды являются акустическими метаматериалами, рабочими зонами которых можно управлять при помощи предварительного напряженного состояния или внешнего воздействия. Обнаружен новый механизм неустойчивости материала, возникающей при всестороннем растяжении, для большого класса редуцированных сред Коссера с выпуклой энергией, отсутствующий в классических средах. Этот результат соответствует известному факту о течении зернистых сред при растяжении. Дана интерпретация экспериментов по распространению ультразвука в когезивном порошке, проведенных при участии соискателя, в терминах редуцированной среды Коссера.

В четвертой главе предложены нелинейная и линейная модели редуцированной среды Кельвина – гироконтинуума, частицы которого вращаются с большой скоростью вокруг своих осей. Предложена также модель редуцированной среды из контейнеров с гиростатами. В обеих средах градиент осей тел-точек не вызывает напряжений.

Исследованы гармонические волны для простейшего вида данных редуцированных гироконтинуумов в линейном приближении. Для большинства направлений распространения волны обладают эллиптической частотно зависимой поляризацией, дисперсионные соотношения весьма сложны. Обе среды оказываются акустическими метаматериалами для волн сдвига, поляризованных противоположно собственному вращению тел-точек (то есть при условии, что скорость вращения вектора перемещения распространяющейся волны направлена под тупым углом к угловой скорости собственного вращения тел-точек). При помощи внешнего следящего момента оказывается возможным изменять рабочую зону и тип акустического метаматериала.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Диссертация Елены Федоровны Грековой, выполненная на тему «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук **соответствует паспорту специальности 1.1.8 –механика деформируемого твердого тела.**

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы **являются новыми и получены автором самостоятельно.**

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается корректным использованием математических методов и фундаментальных законов механики, подтверждается сравнением аналитических и численных результатов, качественным совпадением эффектов, предсказанных теорией, с реальными и численными динамическими экспериментами для композитов с включениями и сыпучих сред.

Полученные **результаты являются новыми** и оригинальными, имеют важное научное значение для механики деформируемого твердого тела, в частности, для развития динамики композиционных материалов. Новизна результатов подтверждена их **апробацией** при обсуждении на представительных конференциях и семинарах, публикациями в известных научных журналах.

Практическая значимость результатов диссертации Е.Ф. Грековой состоит в создании научной базы для проектирования и изготовления обладающих специфическими функциональными свойствами композиционных материалов, и контроля этих свойств посредством проверки характера их восприимчивости к действию различных типов акустических волн разных частот, а также связана с возможностью применения результатов диссертации в сейсморазведке и в ротационной сейсмологии.

Научная и практическая значимость результатов диссертации подтверждена использованием их в рамках проектов:

- совместный проект компании Шелл (Shell E.&P.) и РАН. Волны в сложных средах. (2003–2006), руководителем которого с российской стороны являлась соискатель;
- мелкодисперсный порошок как нелинейная полярная среда: межчастичное взаимодействие и континуальная теория, персональный грант РАН для молодых ученых N95 (2000–2002);
- нелинейные упругие полярные среды: аналогии и выбор тензоров деформации, персональный грант фонда, молодые ученые России, 2001;
- электрогидродинамика суспензий и реология когезивных сыпучих сред, грант правительства Андалузии в категории, выдающиеся проекты, 2006–2009 (исполнитель);
- три гранта правительства Испании, посвященных механике и физике сыпучих и текучих сред (2007–2011, 2011–2014, 2014–2018, участник);
- два гранта РФФИ (1999–2001, 2017–2019, участник);
- работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (госзадание FSEG-2020-0021).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались более чем на 50 международных конференциях в России и за рубежом, были представлены на семинарах ИПМаш РАН, СПбПУ Петра Великого, рабочих встречах исследовательской группы Shell E.&P и Санкт-Петербургского научного кластера, семинаре исследовательской группы университета Севильи «Электродинамика и механика когезивных сыпучих сред», семинаре под руководством Ж.А. Можена лаборатории «Моделирование в механике» (университет Пьера и Марии Кюри), семинаре лаборатории Навье (университет Густава Эйфеля, Национальная школа мостов и французский Национальный центр научных исследований), семинаре лаборатории Школы машиностроения и электротехники (Технологический институт Харбина).

Язык изложения материала в диссертации грамотный, понятный. Изложение логически стройно и последовательно.

Замечания.

1. В данной работе было бы уместным рассмотреть хотя бы в краткой форме физические причины возникновения запрещенных зон пропускания рассматриваемым материалом акустических волн тех или иных частот (запрещенные частоты).
2. Не очень понятен выбор моделей редуцированных континуумов для описания свойств акустических метаматериалов. Было бы уместно в предисловии второй главы, ссылаясь на данные обзора первой главы, обратить внимание на основную особенность акустических метаматериалов – способность изменять знак эффективных материальных параметров системы за счет сложной реакции элементов микроструктуры на динамические воздействия, и подчеркнуть при этом, что эта сложность реакции возникает не только за счет сложности микроструктуры, но и специфики взаимосвязи ее элементов, отражающейся на характере передачи энергии между ними. Одним из способов учета этого является использование редуцированных моделей среды.
3. В оглавлении не указан раздел «Литература».
4. На странице 350 (заключение к четвертой главе) написано: «В обоих случаях будем рассматривать редуцированные среды, упругая энергия которых не зависит от градиента поворота, но зависит от других трансляционных или поворотных деформаций». По-видимому, соискатель имела в виду не план будущих исследований, а проделанную работу?

Перечисленные замечания не отражаются на предлагаемой далее оценке диссертации.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
Положением о присуждении ученых степеней**

Диссертация Грековой Елены Федоровны, выполненная на тему «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела является соответствующей п. 9 Положения ВАК законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, определяющее новое научное направление – развитие теории редуцированных упругих и вязкоупругих сред различной природы, обладающих свойствами акустических метаматериалов, при помощи феноменологических методов механики сплошной среды.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельства о личном вкладе автора диссертации в науку.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что автор диссертации Елена Федоровна Грекова заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, профессор по кафедре «Физика», профессор кафедры «Техническая физика» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», ул. Комсомольская д. 95.

Орловская область, г. Орел,

302026 Российская Федерация,

каф. «Техническая физика».

Контактный телефон: 8 960 655 00 77

Email: V.S.Shorkin@yandex.ru

«Подпись Владимира Сергеевича Шоркина заверяю»

проректор по научно-технологической деятельности и

аттестации научных кадров

Федерального государственного образовательного

учреждения высшего образования «Орловский

государственный университет им. И.С. Тургенева»

Шоркин
Владимир
Сергеевич

31.10.2023

Радченко
Сергей
Юрьевич

