

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.075.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19.12.2023 г, протокол № 42

О присуждении **Грековой Елене Федоровне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов», по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите 12 сентября 2023 г., диссертационным советом 24.1.097.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук» Министерства образования и науки Российской Федерации, 199178, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации о создании диссертационного совета № 1902-1321 от 10.10.2008. Состав совета переутвержден приказом № 1326/нк от 22.06.2023.

Соискатель Грекова Елена Федоровна, 1973 года рождения, в 1999 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» на тему «Нелинейная динамика среды Коссера и упругие ферромагнетики» в диссертационном совете Д200.17.01, созданном на базе ИПМаш РАН. В настоящий момент работает старшим научным сотрудником лаборатории мехатроники ИПМаш РАН и по совместительству доцентом Высшей школы теоретической механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Диссертация выполнена в ИПМаш РАН.

Научный консультант отсутствует.

Официальные оппоненты:

Ерофеев Владимир Иванович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, директор Федерального государственного бюджетного

учреждения науки «Институт проблем машиностроения РАН» - филиала ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

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).

Садовский Владимир Михайлович, гражданин Российской Федерации, 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, д.ф.-м.н., профессор, дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

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 всего еще один тензор, чтобы учесть квадратичную зависимость от градиента $\mathbf{q}_0$? 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. Неясно, полна ли она в смысле совпадения числа неизвестных функций и уравнений. Удовлетворяет ли она термодинамическому принципу положительности 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 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. Неясно, 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.

Шоркин Владимир Сергеевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор по кафедре «Физика», профессор кафедры «Техническая физика» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», дал положительный отзыв на диссертацию с замечаниями:

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?

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, в своем положительном отзыве, подписанном главным научным сотрудником, д.ф.-м.н., академиком РАН Ириной Георгиевной Горячевой и ведущим научным сотрудником, д.т.н., профессором Сергеем Альбертовичем Лурье, и утвержденным директором ИПМех РАН, д.ф.-м.н., членом-корреспондентом РАН Сергеем Евгеньевичем Якушем, указали, что соискателем разработан новый подход к континуальному моделированию акустических метаматериалов различной природы и зернистых, блоковых, консолидированных сыпучих сред, композитных сред с жесткими включениями, введено понятие редуцированной среды – континуума, обладающего при некоторых условиях свойствами акустического метаматериала. Исследовано влияние различных параметров такого континуума на волновые свойства материала, предложены различные модели редуцированных сред Коссера для блоковых, зернистых и композитных сред с включениями, учитывающие нелинейность, различного рода анизотропию, диссипацию, решена задача о распространении волн от сосредоточенных гармонических источников, исследованы особенности волны Рэлея и устойчивость в такой изотропной среде, найден новый механизм ее неустойчивости. Предложена модель редуцированной среды Кельвина, обладающей свойствами акустических гироскопических и магнитоупругих метаматериалов. Проведен дисперсионный анализ перечисленных моделей. Данный подход предлагает новые возможности для разработки интеллектуальных акустических метаматериалов, в том числе на основе гироскопических элементов, и магнитоупругих метаматериалов. Различные модели Коссера могут быть применимы для описания зернистых и композитных сред, результаты моделирования значимы с точки зрения сейсморазведки, ротационной сейсмологии, ультразвуковых исследований сред с микроструктурой.

Отмечается, что автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации, область исследования соответствует паспорту специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела. Диссертация Е.Ф. Грековой «Динамика редуцированных сред Коссера и гироконтинуумов» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании проведенных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела, задающее новое направление в рамках механики сплошных сред сложной структуры – теорию

редуцированных сред, служащих моделями акустических материалов. Работа несомненно выполнена на высоком научном уровне и в полной мере отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Е.Ф. Грекова заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

В отзыве ведущей организации, обсужденном и одобренном 28.11.2023 г., имеются следующие замечания:

1. На стр. 34 соискатель пишет:

«В работе [166] также рассмотрен частный вариант такой среды, при котором микроповорот тождественно равен макropовороту, то есть среда является также средой Коссера со стесненным вращением [178], однако для анизотропного случая эта ситуация невозможна, на что авторы работы [166] не указали.»

С этим нельзя согласиться. Среда Коссера со стесненным вращением является средой Аэро – Кувшинского. Она достаточно легко формулируется как для изотропного, так и для анизотропного случая.

2. В диссертации рассматривается псевдоконтинуум Коссера (см., например, раздел 3.1.10). К сожалению, в списке литературы нет фундаментальной работы Аэро и Кувшинского о псевдоконтинууме Коссера (работа подана в печать в 1959 году, а опубликована в 1962 году).

3. На стр. 52 в формуле (2.6) отсутствует билинейное слагаемое с модулем A_{10} . В формулах (2.7), (2.8) отсутствуют слагаемые, определяемые билинейным слагаемым в кинетической энергии. Это имеет место во всех разделах работы. Нужны аргументы в пользу таких упрощений.

4. В кинетической энергии, введенной в разделе 2, и далее везде игнорируются инерционные эффекты, связанные с градиентами обобщенной переменной $\mathbf{q}_1$. Заметим, что их несущественность даже в варианте алгебраической теории (именно только эти теории рассматриваются в работе) следует проверять в динамических задачах (экспериментально), ибо они меняют закон дисперсии.

5. На странице 80 диссипативная функция записана только относительно скоростей аргументов, хотя диссипативные процессы могут быть более разнообразными и иметь место даже в квазистационарном случае (тогда диссипативная функция может зависеть от самих аргументов так, что линейная вариационная форма становится неинтегрируемой). Следовательно, рассмотрена некоторая диссипативная функция частного вида. Будут ли справедливы полученные в работе выводы в случае более общего выражения для функции диссипации?

6. В главе 3 обсуждается интересный эффект, называемый в работе неустойчивостью. Эффект имеет место в динамических процессах из-за нелинейности в силу того, что эффективные модули среды модифицируются за счет учета предварительного напряженного состояния. Однако автор не дает четких объяснений и определений такой «неустойчивости». Можно ли трактовать это явление как локальную потерю несущей способности среды?

7. Некоторые математические выкладки даются весьма скупо, что затрудняет возможность их проверки. В отдельных разделах работы (см., например, главу 2, главу 3, стр. 236 и далее, главу 4, стр. 323 и т.д.) вводятся тензорные характеристики без прямых ссылок на их первоначальное определение в этой же работе. Это затрудняет чтение.

Соискатель опубликовала 28 работ, индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science, по теме диссертации, в том числе 9 работ в журналах Q1, 5 работ в журналах Q2, 13 работ без соавторов:

[1] Drepin M.A., Grekova E.F. Non-linear simplest reduced Kelvin's medium in the vicinity of the spherical stress state: waves and instabilities // *Sixty Shades of Generalized Continua: Dedicated to the 60th Birthday of Prof. Victor A. Eremeyev*. — Springer, 2023. — P. 117–140.

[2] Grekova E.F. Viscoelastic reduced enhanced isotropic continua as acoustic metamaterials // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2022. — Vol. 380, N 2237. — P.20210371 (Q1)

[3] Generalized macroscale model for Cosserat elasticity using Generalized Multiscale Finite Element Method / D. Ammosov, Ya. Efendiev, E. Grekova, M. Vasilyeva // *Journal of Computational Physics*. — 2022. — Vol. 461. — P. 111011. (Q1)

[4] Piatysheva A.P., Grekova E.F. Reduced linear viscoelastic isotropic Cosserat medium with rotational viscosity: an acoustic metamaterial // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — 2021. — Vol. 33, no. 4. — P. 1765–1780. (Q1)

[5] Grekova E.F., Porubov A.V., dell'Isola F. Reduced linear constrained elastic and viscoelastic homogeneous Cosserat media as acoustic metamaterials // *Symmetry*. — 2020. — Vol. 12. — P.521. (Q2)

[6] Porubov A.V., Grekova E.F. On nonlinear modeling of an acoustic metamaterial // *Mechanics Research Communications*. — 2020. — T. 103. — C. 103464. (Q1)

[7] Grekova E.F., Piatysheva A.P. Reduced linear viscoelastic isotropic Cosserat medium with translational viscosity: a double negative acoustic metamaterial // *Nonlinear Wave Dynamics of Materials and Structures*. — Springer, Cham, 2020. — P. 153–167. (Q4)

- [8] Grekova E.F. Nonlinear isotropic elastic reduced and full Cosserat media: waves and instabilities // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — 2019. — Vol. 31, no. 6. — P. 1805–1824. (Q2)
- [9] Grekova E.F. Reduced enhanced elastic continua as acoustic metamaterials // *Dynamical Processes in Generalized Continua and Structures*. — Springer, 2019. — P. 253–268. (Q3)
- [10] Grekova E.F., Abreu R. Isotropic linear viscoelastic reduced Cosserat medium: an acoustic metamaterial and a first step to model geomedium // *New Achievements in Continuum Mechanics and Thermodynamics*. — Springer, 2019. — P. 165–185. (Q3)
- [11] Grekova E.F. Waves in elastic reduced Cosserat medium with anisotropy in the term coupling rotational and translational strains or in the dynamic term // *Advances in Mechanics of Microstructured Media and Structures*. — Springer, 2018. — P. 143–156. (Q3)
- [12] Grekova E.F. Harmonic waves in the simplest reduced Kelvin's and gyrostatic media under an external body follower torque // *2018 Days on Diffraction (DD) / IEEE*. — 2018. — P. 142–148.
- [13] Grekova E.F. Simplest linear homogeneous reduced gyrocontinuum as an acoustic metamaterial // *Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 1*. — Springer, 2018. — P. 375–386. (Q3)
- [14] Effect of the microstructure on the propagation velocity of ultrasound in magnetic powders / F.R. Botello, M.A.S. Quintanilla, A. Castellanos et al. // *Ultrasonics*. — 2018. — Vol. 82. — P. 153–160. (Q1)
- [15] Grekova E.F. Waves in the reduced elastic Cosserat medium with transversal anisotropy of the coupling between linear rotational and translational deformations: Linearization near natural and axisymmetric prestressed state. Special directions // *Days on Diffraction (DD), 2017 / IEEE*. — 2017. — P. 147–153.
- [16] Grekova E.F. Plane waves in the linear elastic reduced Cosserat medium with a finite axially symmetric coupling between volumetric and rotational strains // *Mathematics and Mechanics of Solids*. — 2016. — Vol. 21, no. 1. — P. 73–93. (Q1)
- [17] Грекова Е.Ф. Об одном классе единой отрицательных акустических метаматериалов // *Доклады академии наук*. — 2015. — Т. 462, N 3. — P. 295–295. (Q2)
- [18] Grekova E.F. On one class of theoretically constructed isotropic single negative continuous acoustic metamaterials // *Days on Diffraction 2014 / IEEE*. — 2014. — P. 101–106.
- [19] Grekova E.F. Nonlinear isotropic elastic reduced Cosserat continuum as a possible model for geomedium and geomaterials. Spherical prestressed state in the semilinear material // *Journal of Seismology*. — 2012. — Vol. 16, no. 4. — P. 695–707. (Q2)

- [20] Грекова Е.Ф. Линейная редуцированная среда Коссера с шаровым тензором инерции, вращения в которой не наблюдаются в эксперименте // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2012. — N 5. — С. 58–64. (Q4)
- [21] Grekova E.F. Small perturbations of the spherical prestressed state in a nonlinear isotropic elastic reduced Cosserat medium: waves and instabilities // Proceedings of the International Conference Days on Diffraction 2011 / IEEE. — 2011. — P. 78–82.
- [22] Grekova E.F., Kulesh M.A., Herman G.C. Waves in linear elastic media with microrotations, part 2: Isotropic reduced Cosserat model // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2009. — Vol. 99, no. 2B. — P. 1423–1428. (Q1)
- [23] Кулеш М.А., Грекова Е.Ф., Шардаков И.Н. Задача о распространении поверхностной волны в редуцированной среде Коссера // Акустический журнал. — 2009. — Vol. 55, no. 2. — P. 216–225. (Q3)
- [24] Kulesh M.A., Grekova E.F. Rayleigh-type waves for the isotropic elastic reduced Cosserat half-space application in rocks and soils // Saint Petersburg 2006 International Conference and Exhibition. — 2006.
- [25] Harris D., Grekova E.F. A hyperbolic well-posed model for the flow of granular materials // Journal of Engineering Mathematics. — 2005. — Vol. 1, no. 52. — P. 107–135. (Q1)
- [26] Grekova E.F., Maugin G.A. Modelling of complex elastic crystals by means of multi-spin micromorphic media // International Journal of Engineering Science. — 2005. — Vol. 43, no. 5-6. — P. 494–519. (Q1)
- [27] Grekova E.F., Herman G.C. Wave propagation in rocks modeled as reduced Cosserat continuum with weak anisotropy // 67th EAGE Conference & Exhibition / EAGE Publications BV. — 2005. — P. Cp-1.
- [28] Grekova E.F., Herman G.C. Soils and rocks in terms of anisotropic reduced Cosserat continuum: peculiarities of wave propagation // Powders and Grains 2005, Two Volume Set: Proceedings of the International Conference on Powders & Grains 2005, Stuttgart, Germany, 18-22 July 2005 / Taylor & Francis. — 2005. — P. 425.

Материалы диссертации рассматривались более чем на 50 международных и всероссийских конференциях и на различных представительных научных семинарах.

На автореферат поступило 8 отзывов (все положительные):

1. Отзыв ведущего научного сотрудника лаборатории комплексных электрофизических исследований ФГБУН «Институт электрофизики УрО РАН» Болтачева Грэя Шамилевича

с замечанием и вопросом:

– По-видимому, дисперсионные характеристики редуцированной упругой среды Коссера с трансверсально-изотропной перевязкой между объемной деформацией и поворотами (рис. 7) использованы для интерпретации эксперимента по распространению высокочастотной акустической волны в когезивном порошке (рис. 9). Не вполне ясно, так ли это. Можно ли предложить частоту отсечки в качестве характеристики консолидированного сыпучего материала? Какое поведение можно ожидать от порошка при возбуждении колебаний на этой частоте?

2. Отзыв профессора кафедры «Информационные системы и вычислительная техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктора физико-математических наук, профессора Бригаднова Игоря Альбертовича с замечанием и вопросом:

– Автор показала, что изотропная редуцированная упругая среда Коссера при всестороннем сжатии или растяжении может потерять устойчивость, так как эффективные модули зависят от предварительного напряженного состояния. Было бы интересно выяснить, при каком предварительном растяжении или сжатии эффективная упругая энергия среды, соответствующая малым деформациям относительно данного состояния, перестает быть положительной, и, таким образом, нарушается условие теоремы Кирхгофа о единственности решения статической задачи.

3. Отзыв директора Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного Федерального университета, д.ф.-м.н., доцента Карякина Михаила Игоревича с замечанием – рекомендацией:

– отдельный интерес вызывает использование развитых в работе математических моделей для решения задач о телах и устройствах конечных размеров и конкретной формы. Поэтому возникает естественный вопрос о возможности встраивания подобных моделей в те или иные вычислительные комплексы, например, конечно-элементные. Это может повысить точность и адекватность моделирования многих явлений, происходящих в неоднородных телах не только сложной структуры, но и сложной формы, а кроме того, позволит решать различные задачи, связанные с определением параметров построенных моделей для конкретных сред. Данное замечание может рассматриваться как рекомендация об одном из возможных направлений развития диссертационных исследований.

4. Отзыв заведующего лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения РАН – филиала ФБГУН «Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН», д.ф.-м.н., доцента

Келлера Ильи Эрнстовича с замечанием – рекомендацией:

– уравнения упруго-пластического континуума Коссера, линеаризованные в напряженной конфигурации (гипоупругость), оказываются более многообразными по сравнению с рассмотренным в разделе 3.1.5 гиперупругим материалом, что может быть поводом для продолжения исследований в этом направлении. Можно обратить внимание на работы Р. Хилла, который систематически использовал анализ тензора Кристоффеля в задачах устойчивости упруго-пластических сред в напряженной конфигурации с учетом произвольной геометрической нелинейности.

5. Отзыв заведующего кафедрой математического моделирования Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, профессора, д.ф.-м.н. Наседкина Андрея Викторовича с замечаниями:

- Результат под номер 1 сформулирован не совсем удачно («управлять при помощи напряженно-деформированного состояния...»)
- По-видимому, энергетика волн в средах с поворотными степенями свободы заслуживает большего внимания. Было бы интересно исследовать такие классические темы для обычных упругих волн, как теоремы о вириале, связь групповой скорости с вектором потока энергии (вектором Умова – Пойнтинга) и т. п.
- Также было бы интересно исследовать поведение дисперсионных кривых и запрещенных зон при предельных случаях малых материальных констант связанности.

6. Отзыв заведующего лабораторией волновых процессов кафедры газовой и волновой динамики мехмата МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., профессора Смирнова Николая Николаевича с замечаниями:

- На стр. 10, второй абзац сверху, пропущен предлог «от».
- Обычно точкой в формулах обозначается операция свертки. На стр. 18 в формуле, следующей за (17), присутствует две точки последовательно, и смысл не объяснен.

7. Отзыв профессора физического факультета Национального исследовательского университета ИТМО, д.ф.-м.н. Уздина Валерия Моисеевича с замечанием:

- По-видимому, разрабатываемые модели на разных пространственных масштабах применимы для гораздо более широкого класса систем, чем обсуждается в работе, включающих магнитные и жидкокристаллические структуры с топологическими солитонами, а возможно, и климатические модели. Комментарий специалиста был бы здесь уместен.

8. Отзыв начальника сектора 351 ФГУП «Крыловский государственный научный центр», д.т.н., профессора Ярцева Бориса Александровича, с замечанием:

– С практической точки зрения представляет интерес, какого именно типа композиты могут быть описаны при помощи моделей редуцированных сред и, таким образом, проявлять свойства акустических метаматериалов. Следовало бы пояснить это в автореферате.

Ответы на замечания даны в ходе защиты. Во всех отзывах указывается, что автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они представляют собой признанных компетентных действующих специалистов в области механики деформируемого твердого тела, имеющих научные публикации в областях науки, затрагиваемых диссертацией, способных определить теоретическую и практическую ценность диссертационной работ.

По результатам защиты диссертационный совет отмечает, что основные научные результаты, полученные соискателем, заключаются в следующем:

1. Введено понятие и развита теория упругих редуцированных сред сложной структуры типа «несущий континуум + распределенный динамический гаситель», упругая энергия которых не зависит от деформации последнего. Показано, что линейные упругие редуцированные среды при определенных требованиях к их упругой и кинетической энергии являются акустическими метаматериалами вне зависимости от природы своих степеней свободы, то есть обладают запрещенными зонами частот и/или зонами аномального преломления (падающими участками дисперсионных кривых).
2. Показано, как, управляя взаимосвязью субконтинуумов или внешним следящим воздействием, можно изменять рабочие зоны метаматериала и их тип. Наиболее эффективно управлять волновыми свойствами изотропного материала позволяет взаимосвязь «деформация несущего континуума – обобщенная координата динамического гасителя», а гиротропного — она же в сочетании со взаимосвязью обеих координат.
3. Показано, что добавление линейной диссипации к упругим связям редуцированной среды обеспечивает существование бегущей затухающей волны почти на всех частотах. Малая диссипация может способствовать более медленному затуханию колебаний в запрещенной зоне упругого материала и превращать ее часть в падающий участок — рабочую зону дважды отрицательного акустического метаматериала.
4. Предложены различные модели редуцированных сред Коссера. Показано, что при линейных колебаниях они являются акустическими метаматериалами, рабочими зонами которых можно управлять при помощи нелинейного напряженно-деформированного состояния, малой диссипации и внешнего следящего момента.

5. Для сосредоточенных гармонических нагрузок в неограниченной изотропной упругой линейной редуцированной среде Коссера получена функция Грина, вид которой свидетельствует о возможности резонансных или локализованных вблизи источника решений.
6. Найден новый механизм неустойчивости нелинейных изотропных упругих сред Коссера с энергией деформации, являющейся выпуклой функцией, при большом всестороннем растяжении, отсутствующий у классических сред.
7. Предложены модели простейшей редуцированной среды Кельвина, имеющей аналогию с магнитоупругими материалами, и простейшей гиростатической среды. Показано, что обе среды являются акустическими метаматериалами, рабочую зону и тип которых можно менять при помощи внешнего следящего момента.

Теоретическая значимость работы обусловлена предложенным соискателем новым направлением в рамках теории сплошных сред сложной структуры – теорией редуцированных сред. Данная теория открывает путь поиска и разработки умных акустических метаматериалов различного строения и природы. Показана неоднозначная роль диссипации в средах такого рода, которая в некоторых случаях способствует лучшему прохождению колебаний. Также развиты модели редуцированных сред Коссера, не реагирующих на взаимный поворот частиц, которые могут эффективно использоваться для описания сред зернистой и блоковой структуры, композитов с включениями и других сред с неупорядоченными полями поворотов. Предложенные модели гироконтинуумов или их модификации могут служить для описания магнитострикционных сред со слабым обменным взаимодействием. Практическая значимость работы обусловлена возможным применением таких моделей в ротационной сейсмологии, их перспективностью с точки зрения сейсморазведки и ультразвуковых исследований, для создания интеллектуальных акустических метаматериалов, в том числе магнитоупругих или содержащих гироскопические элементы, в создании научной базы для проектирования композиционных материалов с особыми акустическими свойствами.

В диссертации используются фундаментальные законы механики, методы тензорного исчисления, дисперсионный анализ. Теоретические результаты верифицированы при помощи численных методов, использованы результаты экспериментов, проведенных как при участии соискателя, так и другими исследователями. Это обеспечивает достоверность и обоснованность результатов работы. Личный вклад соискателя в совместных публикациях четко оговорен. Все выносимые на защиту результаты являются новыми и получены автором самостоятельно.

Седакова Е.Б.