

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.320.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 22.11.2024 № 24/04

О присуждении Ханазаряну Артуру Дерениковичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование и исследование волновых процессов в упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами» по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите 09 сентября 2024 г. (протокол заседания № 24/03) диссертационным советом 24.2.320.03, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149) в соответствии с приказами Минобрнауки России № 426-155 от 12.03.2010 г. (о создании) и № 561/нк от 03.06.2021 г. (об установлении полномочий).

Соискатель Ханазарян Артур Дереникович, 7 июня 1997 года рождения.

В 2020 году соискатель освоил программу специалитета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» по специальности 01.05.01 – «Фундаментальные математика и механика». В 2024 году – программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» по направлению подготовки 01.06.01 – «Математика и механика». В период подготовки диссертации и в настоящее время Ханазарян А. Д. работает в институте математики, механики и информатики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности инженера-исследователя.

Диссертация выполнена на кафедре теории функций факультета математики и компьютерных наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Голуб Михаил Владимирович, заведующий кафедрой теории функций факультета математики и компьютерных наук федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. **Соловьев Аркадий Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики, ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова»,

2. **Юров Виктор Олегович**, кандидат физико-математических, старший научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений, Южный математический институт-филиал ФГБУН Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук»

– дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук

(г. Москва) – в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций Шифриным Е. И. и утвержденном доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН, директором Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН Якушем С. Е., указала, что представленная на защиту диссертационная работа является самостоятельным, законченным научным исследованием, посвященным актуальной теме и имеющим важное фундаментальное и прикладное значение, и что диссертация «Моделирование и исследование волновых процессов в упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами» представляет собой научно-квалификационную работу, удовлетворяющую пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор – Ханазарян Артур Дереникович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 6 научных статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, 12 работ – публикации в материалах и трудах конференций. Все результаты получены соискателем лично либо при его непосредственном участии. В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, а также в рецензируемых научных изданиях, включенных в базы данных Scopus и Web of Science:

1. Ханазарян, А. Д. Гибридный метод для моделирования антиплоских колебаний слоистых волноводов с присоединенными элементами / А. Д. Ханазарян, М. В. Голуб // Вычислительная механика сплошных сред. — 2023. — Т. 16. — № 1. — С. 101–114.
2. Ханазарян, А. Д. Гибридный полуаналитический метод моделирования плоских колебаний слоистых волноводов с присоединенными элементами / А. Д. Ханазарян // Экологический вестник научных центров ЧЭС. — 2024. — Т. 21. — № 2. — С. 46–61.
3. Numerical methods for simulation elastic wave propagation in layered periodic elastomer composites / S. I. Fomenko, M. V. Golub, A. D. Khanazaryan, A. N. Shpak // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. — 2021. — Vol. 23. — P. 261–271.
4. Design, manufacturing, experimental and theoretical study of elastic wave propagation in multilayered acoustic metamaterial with interfacial crack-like voids / M. V. Golub, I. A. Moroz, Y. Wang, A. D. Khanazaryan [et al.] // Acoustics. — 2023. — Vol. 5. — № 1. — P. 122–135.
5. Experimental investigation of band-gaps in two-layered acoustic metamaterials with arrays of strip-like cracks / M. V. Golub, I. A. Moroz, A. D. Khanazaryan, K. K. Kanishchev [et al.] // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. — 2024. — Vol. 41. — P. 180–187.

В этих и остальных работах изложены основные результаты Ханазаряна А. Д. в области моделирования и исследования волновых процессов в упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами. Основные научные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Вклад соискателя в публикациях: в статьях 1, 2 предложен гибридный полуаналитический метод моделирования плоских и антиплоских колебаний слоистых волноводов с присоединенными элементами, проводится численный анализ; в статье 3 формулируется и решается дисперсионное уравнение для периодического слоистого композита из эластомеров методом спектральных элементов с периодическими граничными условиями; в работах 4 – 5 проводится экспериментальное исследование явления формирования запрещенных зон для метаматериалов с полостями.

На диссертационную работу и автореферат поступили 4 отзыва:

кандидата физико-математических наук, доцента кафедры динамики и прочности машин федерального государственного автономного образовательного

учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Ташкинова М. А. – положительный. Замечаний нет;

доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики института математики, механики и компьютерных наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Сумбатяна

М. А. – положительный. Замечаний нет;

доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой математического моделирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» Наседкина А. В. – положительный. В отзыве имеются замечания:

1. «Постановка рассматриваемых задач приводится для общего случая анизотропных сред. Но анализ конкретных задач проведен, по-видимому, только для изотропных материалов. Поэтому остается не совсем ясным, сохраняют ли предлагаемые методы свою работоспособность для упругих метаматериалов из анизотропных компонент.»;

2. «В автореферате при описании раздела 4.1 диссертации приведены довольно необычные значения модулей жесткости, вероятно, для тела с предварительным растяжением, которое за счет этого растяжения становится анизотропным. Дается ссылка на работу, в которой приведенные формулы в точности отсутствуют. В связи с этим было бы полезно дать более расширенное описание используемых здесь модулей жесткости и их обоснование.»;

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории математического моделирования волновых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук Гаврилова С. Н. – положительный. В отзыве имеется следующее замечание:

«На стр. 3 автореферата даётся определение метаматериалов как «искусственно созданных композитных материалов с периодическим изменением свойств в одном или нескольких направлениях, превосходящих по характеристикам свойства отдельных компонент». Не только периодические композитные материалы могут обладать свойствами метаматериалов. Например, однородные среды Коссера при определённых условиях демонстрируют характерные свойства метаматериалов, такие как наличие диапазона непропускания в определенной частотной области, см., например, работу *E. F. Grekova, A. V. Porubov, and F. dell'Isola. Reduced linear constrained elastic and viscoelastic homogeneous Cosserat media as acoustic metamaterials. Symmetry, 12(4):521, 2020.*»;

В отзывах официальных оппонентов и ведущей организации имеются следующие основные замечания:

1. «На странице 22 в верхней строке вводится пространство тестовых функций $Y = \{v | v \in L_2(V), v(x) = 0, x \in \partial V\}$. Однако, для функций из L_1 граничные значения не определяются.» (в отзыве ведущей организации);

2. «На наш взгляд следовало более аккуратно описать полуаналитический метод. Например, рассмотрим формулу (2.24) на странице 37. Здесь написано, что эта формула следует из формулы (1.16). Строго говоря, это не совсем так. В (1.16) рассматривается пространство пробных функций, зависящих от двух переменных, а в (2.24) — от одной. Кроме того, на странице 38 определяется преобразование Фурье

$$U(\alpha, x_2) = F_{x_1} [u_2(x_1, x_2)] = \int_{-\infty}^{+\infty} u_2(x_1, x_2) e^{i\alpha x_1} dx_1$$

Отметим, что функция $u_2(x_1, x_2)$ определена на протяженном, но конечном интервале. Поэтому следовало уточнить, какое продолжение функции $u_2(x_1, x_2)$ используется для определения $U(\alpha, x_2)$.» (в отзыве ведущей организации);

3. «В качестве преимуществ разработанного метода указывается меньшие вычислительные затраты, но при этом отсутствует сравнение времени, которое затрачивается на вычисления с помощью разработанного гибридного метода и с помощью МКЭ.» (в отзыве официального оппонента Соловьева А. Н.);

4. «На стр. 22 в определении тестовых функций предполагается их равенство нулю на границе, далее говорится, что их выбор зависит от граничных условий, что требует пояснений.» (в отзыве официального оппонента Соловьева А. Н.);

5. «На рис. 1.3 в ячейке структуры присутствует не прямоугольная область, однако далее говорится о прямоугольных конечных элементах, остается неясным, как разбивается такая область.» (в отзыве официального оппонента Соловьева А. Н.);

6. «В п. 2.3.1 говорится о плоских колебаниях, но не уточняется, какой рассматривается случай, плоская деформация или плоско напряженное состояние.» (в отзыве официального оппонента Соловьева А. Н.);

7. «Разработанная гибридная вычислительная схема описана в общем случае для анизотропных тел. Однако в главе 4 приведены результаты численного анализа только применительно к изотропным телам (сталь, алюминий). Неясно реализовано ли в виде компьютерных программ решение задачи для анизотропных сред.» (в отзыве официального оппонента Соловьева А. Н.);

8. «Автор применяет преобразование Фурье для конечной области (слабая постановка на стр. 37), при этом отсутствуют внеинтегральные слагаемые, порожденные границами рассматриваемой прямоугольной области.» (в отзыве официального оппонента Юрова В. О.);

9. «В работе отсутствует сравнение комплексных ветвей дисперсионного множества, полученных по методу ПАМКЭ с ветвями, получаемыми путем решения дисперсионного уравнения, которое может быть в явном виде записано для однородной полосы.» (в отзыве официального оппонента Юрова В. О.);

10. «Не приводится примеров, которые бы продемонстрировали структуру используемых интерполяционных полиномов с узлами Гаусса-Лежандра-Лобатго.» (в отзыве официального оппонента Юрова В. О.);

11. «Введена функция перемещений для «сшивки» в (2.19). Значит ли это, что условие непрерывности перемещений в (2.18) выполнено автоматически, а сопряжение по напряжениям еще нужно обеспечить дополнительно?» (в отзыве официального оппонента Юрова В. О.).

Соискатель ответил на вопросы и замечания по диссертации и автореферату, сделанные ведущей организацией, официальными оппонентами и специалистами в данной области, привел собственную аргументацию в интерпретации полученных результатов, а также согласился с замечаниями стилистического и оформительского характера.

Все отзывы положительные, в них отмечается актуальность и сложность выбранной проблемы диссертационного исследования, научная новизна и достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием компетенций в области механики деформируемого твердого тела и исследований волновых процессов в упругих телах, в том числе математического моделирования и физико-математических методов анализа. Указанные компетенции подтверждаются наличием публикаций оппонентов и сотрудников ведущей организации в областях исследований, связанных с тематикой диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая полуаналитическая гибридная вычислительная схема, на основе которой строится компьютерная модель, описывающая динамическое поведение протяженных слоистых упругих структур с присоединенными элементами;

предложены механико-математические и компьютерные модели на основе новой полуаналитической гибридной вычислительной схемы для анализа колебаний упругих метаматериалов с протяженными элементами и полостями и

колебаний протяженных слоистых упругих структур с присоединенными элементами;

доказана возможность формирования запрещенных зон для новых типов упругих метаматериалов с полостями;

новые термины и понятия не вводились.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что полуаналитическая гибридная вычислительная схема применима для описания динамического поведения упругих метаматериалов и протяженных слоистых упругих структур с присоединенными элементами;

применительно к проблематике диссертации **использованы** метод конечных элементов высокого порядка точности и полуаналитический метод конечных элементов, которые составляют основу полуаналитической гибридной вычислительной схемы, а также метод матриц переноса и интегральный подход;

изложены результаты анализа влияния параметров ячеек упругих метаматериалов на распространение волн;

раскрыты особенности применения разработанных методов к исследованию волновых явлений, возникающих при дифракции упругих волн в упругих метаматериалах с протяженными элементами;

изучено влияние параметров упругих метаматериалов с двухслойной ячейкой, содержащей интерфейсную полость, и упругих метаматериалов в виде пластины с массивом полостей на распространение волн и формирование запрещенных и разрешенных зон;

проведена модернизация подхода к построению полуаналитических гибридных вычислительных схем для анализа колебаний упругих метаматериалов и слоистых упругих структур с присоединенными элементами.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены механико-математические модели, позволяющие производить расчеты влияния конфигурации ячеек упругих метаматериалов с полостями на распространение волн и формирование запрещенных и разрешенных зон; разработанные методы и модели использованы при выполнении проектов при поддержке Российского научного фонда (проект 22-11-00261), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 21-51-53014-ГФЕН_а, 19-41-230012 р_а и 18-501-12069-ННИО_а), Кубанского научного фонда (проект МФИ-20.1/118), а также в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-470.2020.1 и государственных заданий Минобрнауки России (FZEN-2020-0017 и FZEN-2024-0003);

определены перспективы применения результатов для разработки новых типов упругих метаматериалов, востребованных в области ультразвукового неразрушающего контроля;

созданы образцы упругих метаматериалов с полостями, для которых экспериментально продемонстрировано наличие запрещенных зоны;

представлены методы определения оптимальных параметров полостей для получения наиболее широких запрещенных зон.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на современном сертифицированном оборудовании; показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях;

теория построена на основе применения строгих математических методов, согласуется с опубликованными численными и экспериментальными данными по теме диссертационного исследования и смежным отраслям механики деформируемого твердого тела;

идеи базируются на современных представлениях механики деформируемого твердого тела и результатах анализа волновых процессов, происходящих в упругих структурах;

использованы сравнения авторских данных с численными результатами, полученными другими исследователями;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках в частных случаях;

использованы современные методы математического моделирования и численного эксперимента, современные методики получения и обработки экспериментальных данных физического эксперимента.

Личный вклад соискателя состоит в: совместной с научным руководителем постановке цели и задач диссертационной работы, а также в формулировке положений, выносимых на защиту. Автором разработана новая полуаналитическая гибридная вычислительная схема, и на ее основе разработаны механико-математическая и компьютерная модели, описывающие динамическое поведение протяженных слоистых упругих структур и метаматериалов с протяженными элементами. Кроме того, личное участие автора заключается в проведении теоретико-экспериментального анализа влияния конфигурации ячеек упругих метаматериалов с полостями на распространение волн и формирование запрещенных и разрешенных зон. Экспериментально подтверждена возможность формирования запрещенных зон для новых типов упругих метаматериалов с полостями.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

Что вы понимаете под метаматериалами? Что такое гибридная схема? (академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Бабешко В. А.); Какие волны использовались при возбуждении преобразователем, упругие или поперечные волны? Что под этим понимается “использовался сигнал в виде нестационарной импульсной нагрузки. Измерения повторялись десять тысяч раз...”? О чем идет речь? (д.т.н., проф. Яковенко Н. А.); Вы рассмотрели вот этот составной “молоток”. А где он потом использовался, чтобы моделировать волновод с периодической структурой? Теоретическая кривая на одном из последних слайдов рассчитывалась по этой же гибридной схеме? (д.ф.-м.н., проф. Глушков Е. В.); Вы сравнивали решение, полученное на COMSOL и по своей гибридной модели, у вас есть рисунок, где проводится сравнение. Если мы видим, что конфигурация практически идентична, а по цвету они различны. А что характеризует цвет? Вы использовали для реализации своей схемы какой-то другой продукт, среду программирования? (д.ф.-м.н., доцент. Лебедев К. А.); Вначале вы говорили, что используете такие элементы для зондирования. А в качестве чего вы будете использовать такого рода устройства? На каких частотах у вас предположительно будет работать устройство? (д.ф.-м.н., доцент. Строганова Е. В.); Расчеты вы проводили для конечных размеров или бесконечных? Вы учитывали в случае конечных размеров отражения от стенок? (академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Бабешко В. А.).

Соискатель Ханазарян А. Д. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- Под метаматериалами понимаются чаще всего периодические композитные материалы с необычными свойствами, которые не встречаются у традиционных материалов - это отрицательная рефракция, формирование запрещенных зон и т.п. Такие материалы широко используются на практике. Виброзащита и сейсмозащита и т.д.
- Гибридные методы в последние десятилетия активно развиваются. Основной идеей этих методов является сочетание прямых численных и полуаналитических методов для использования преимуществ отдельных методов и некоторым образом нивелирования их недостатков, тем самым улучшив качество моделирования.
- Для сканирования использовался лазерный вибромметр, который измерял скорости перемещений на поверхности образца вдоль линии сканирования.
- Он использовался для следующего типа метаматериала, представленного справа на слайде.
- Для этого использовался коммерческий пакет COMSOL.
- Справа у нас есть цветовая шкала. Видно, что границы этих шкал идентичны.
- Все компьютерные модели были реализованы в среде MATLAB.

- Такого рода материалы на практике могут быть использованы в качестве ультразвуковых преобразователей, для конвертации мод, для фокусировки и т.д.
- Обычно диапазон не такой широкий на практике. Для этого исследователями разрабатываются соответствующие модели, для того чтобы оптимизировать структуру ячеек периодического материала с тем, чтобы максимизировать диапазон запрещенных зон. Ориентировочно до 100 кГц наблюдаются запрещенные зоны.
- Расчеты можно проводить как для конечных областей, так и можно рассчитывать периодические структуры, если задать периодические условия, в рамках гибридной вычислительной схемы.
- В разложении для правой протяженной области используются все распространяющиеся моды.

На заседании 22 ноября 2024 г. диссертационный совет принял решение за разработку механико-математической модели, описывающей динамическое поведение периодических упругих структур с ячейками, состоящими из слоистого волновода и присоединенных элементов произвольной формы, позволяющей проводить параметрический анализ характеристик упругих метаматериалов на предмет возможности формирования запрещенных зон и возможности преобразования различных типов упругих волн, а также за проведение комплексных экспериментальных исследований присудить Ханазаряну Артуру Дерениковичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение учёной степени 15 (пятнадцать), против присуждения учёной степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного
совета 24.2.320.03,
академик РАН, д.ф.-м.н., проф

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.
д.ф.-м.н., профессор



Бабешко
Владимир Андреевич

Зарецкая
Марина Валерьевна

22 ноября 2024 г.