

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Ханазаряна Артура Дерениковича:

«Моделирование и исследование волновых процессов в упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности

1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

В последние годы в области проектирования акустических и упругих метаматериалов можно наблюдать значительные успехи. Важным инструментом создания таких инновационных материалов с уникальными свойствами стало использование математического моделирования в сочетании с современными методами, включая аддитивные технологии, что открывает новые горизонты для дальнейшей экспериментальной проверки их характеристик. В этом плане исследование Ханазаряна А. Д. оставляет заметный след, поскольку оно посвящено анализу волновых процессов в метаматериалах и сложных упругих системах с присоединенными элементами, гармонично сочетая теоретические исследования с практическими экспериментами.

Одним из основных достижений работы является разработка гибридного полуаналитического подхода к численному моделированию, который позволяет эффективно и с высокой точностью исследовать структуры, включающие протяженные волноводы и элементы сложной геометрии. Необходимость разработки такого метода обусловлена тем, что прямые численные расчеты требуют значительных ресурсов для оптимизации метаматериалов, тогда как аналитические методы дают возможность глубже понять, как распространяются отдельные моды колебаний в таких системах. В работе Ханазаряна А. Д. предложен новый подход, объединивший преимущества обоих типов методов, и подтвердил его эффективность как с точки зрения теории, так и с точки зрения практики, что позволило успешно применять его к упругим структурам и метаматериалам конечных размеров.

Таким образом, тема диссертационной работы Ханазаряна Артура Дерениковича «Моделирование и исследование волновых процессов в

упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами» является, безусловно, **актуальной**.

В процессе выполнения диссертации актуальная тематика была поддержана грантами Российского научного фонда 22-11-00261, государственного задания Минобрнауки России FZEN-2020-0017 и FZEN-2024-0003, Российского фонда фундаментальных исследований 21-51-53014-ГФЕН\а, 19-41-230012 р\а и 18-501-12069-ННИО\а, Кубанского научного фонда МФИ-20.1/118, а также грантом Президента Российской Федерации МК-470.2020.1.

Объем диссертации – 125 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 123 источников.

Во введении диссертации освещены новизна и актуальность проведенного исследования, его цели, а также ключевые положения, выносимые на защиту. Представлена теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы и обоснована их достоверность, а также дается информация об апробации работы и публикациях. Также был выполнен обзор текущего состояния проблемы, проведен анализ предыдущих исследований и методов, применяемых для решения схожих задач.

В первой главе представлены ключевые аспекты динамической теории упругости, которые служат основой для последующего представления результатов исследования, а также формулируются краевые задачи в том числе в обобщенной (вариационной) постановке. Поскольку в диссертационном исследовании большое внимание уделено рассмотрению распространения волн в упругих метаматериалах, второй раздел посвящен граничным условиям в контексте теории Флоке-Ляпунова. Представленные условия учитывают периодическое изменение свойств композитов в одном или двух направлениях.

Во второй главе приводится детальное описание численных методов, используемых для решения задач, касающихся установившихся гармонических плоских и антиплоских колебаний многослойных волноводов и упругих структур конечных размеров в двумерной постановке. В первом разделе акцентируется внимание на методе матриц переноса, а также на методе конечных элементов высокого порядка точности (МКЭ ВПТ). Оба этих метода могут быть использованы для анализа распространения плоских волн в слоистых фононных кристаллах. Они дают схожие результаты, обеспечивают высокую точность расчетов и позволяют учитывать сложные волновые явления, что делает их особенно полезными в контексте современных исследований в области динамической теории упругости. В следующих двух разделах дается подробная схема решения вспомогательных

задач с помощью МКЭ ВПТ и полуаналитического метода конечных элементов (ПАМКЭ). В четвертом разделе кратко обсуждается интегральный подход (ИП) и проводится сравнение с ПАМКЭ на примере расчета медленностей. Показано, что ПАМКЭ дает сопоставимые с ИП результаты.

В первом разделе **третьей главы** представлена разработанная гибридная численно-аналитическая вычислительная схема, предназначенная для решения динамических задач теории упругости для волноводов конечной длины с одним присоединенным элементом в плоской и антиплоской постановке. Эта схема основана на решениях вспомогательных задач, рассматриваемых во второй главе. Во втором разделе рассматривается возможность модификации гибридной вычислительной схемы для моделирования дифракции набегающей упругой волны на присоединенном элементе. Это расширение схемы позволяет более эффективно анализировать сложные взаимодействия волн с различными структурами и неоднородностями. В третьем разделе предложенная вычислительная схема обобщается на случай колебаний периодических упругих композитов, что открывает новые перспективы для изучения динамических свойств этих материалов.

В **четвертой главе** представлен численный и экспериментальный анализ волновых процессов в исследуемых структурах. В первом разделе внимание уделяется распространению сдвиговых волн в периодической структуре с двухслойной ячейкой, составленной из различных эластомеров. Рассчитанные с помощью метода матриц переноса и МКЭ ВПТ дисперсионные кривые демонстрируют незначительные различия. Во втором разделе обсуждаются сходимость гибридного метода и хорошее совпадение расчетов, выполненных на основе разработанного метода, с результатами МКЭ в антиплоской и плоской постановке для упругих изотропных и анизотропных тел конечных размеров. Это подтверждает эффективность предложенной схемы и ее универсальность при исследовании различных материалов. Третий и четвертый разделы описывают процесс изготовления образцов упругих метаматериалов с полостями и схему проведения эксперимента соответственно. В пятом разделе анализируются экспериментальные данные для упругих метаматериалов с двухслойной ячейкой, содержащей интерфейсную полость. В частности, показана возможность формирования запрещенных зон. В шестом разделе изучается распространение волн в упругих метаматериалах в виде пластины с массивом полостей. Решается оптимизационная задача, в рамках которой была найдена максимальная ширина запрещенной зоны. Производится экспериментальное подтверждение наличия запрещенной зоны с учетом решения оптимизационной задачи.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В целом, диссертация отличается хорошим уровнем литературного изложения и четкой структурой.

Достоверность исследований основывается на строгой постановке задач, корректного применения математических методов, тщательном анализе сходимости разработанных численных алгоритмов, сравнением частных случаев с известными результатами других авторов и экспериментальными данными.

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций диссертации не вызывает сомнений.

Научные результаты, полученные соискателем, заключающиеся в разработке новой гибридной численно-аналитической вычислительной схемы и соответствующей механико-математической модели, являются **новыми**. Кроме того, значимыми результатами исследования являются анализ запрещенных зон и собственных колебаний упругих метаматериалов новых типов. Ханазарян А. Д. впервые провел теоретико-экспериментальный анализ влияния конфигурации ячеек упругих метаматериалов с полостями на распространение волн, а также на формирование запрещенных и разрешенных зон. Эти результаты открывают новые перспективы для дальнейших исследований в данной области.

Результаты диссертационной работы получили широкую апробацию на международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК и индексируемых в Web of Science или Scopus. По качеству и количеству публикаций диссертация Ханазаряна А. Д. полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Практическая значимость полученных результатов определяется их применимостью для решения актуальных задач в области неразрушающего ультразвукового контроля, а также при моделировании и проектировании новых типов упругих и акустических метаматериалов. Эти результаты открывают новые перспективы для внедрения разработанных вычислительных подходов в инженерную практику, способствуя дальнейшему развитию методов неразрушающего контроля с использованием новых материалов.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание работы и отвечает всем предъявляемым требованиям.

По диссертационной работе Ханазаряна Артура Дерениковича имеются следующие **замечания и рекомендации**:

1. В формуле (1.6) знак тождества между величинами разной размерности.
2. В предложении на стр. 18. "При описании составных тел или тел с неоднородностями, в том числе, упругих метаматериалов, как правило предполагается отсутствие скачков перемещений и напряжений на границах раздела различных сред" нужно писать вектора напряжений.
3. В формуле
$$[[u(x)]] = \lim_{x \rightarrow x^+} u^{(2)}(x) - \lim_{x \rightarrow x^-} u^{(1)}(x) = 0, \quad x \in S_1$$
 x в пределах принадлежит 1-ому и 2-ому телам, а не поверхности.
4. 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.
5. На стр. 21 есть неразбериха с индексами у перемещений и аргументов для двумерной формулировки.
6. 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.
7. На рис. 1.3 в ячейке структуры присутствует не прямоугольная область, однако далее говорится о прямоугольных конечных элементах, остается неясным, как разбивается такая область.
8. В п. 2.3.1 говорится о плоских колебаниях, но не уточняется, какой рассматривается случай, плоская деформация или плоско напряженное состояние.
9. 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.
10. В общей постановке задач рассматривается теория линейной электроупругости, для которой не описаны граничные условия, однако все результаты относятся к упругим телам, возникает вопрос, зачем приведена такая постановка.
11. Одна буква θ используется в трех значениях в одной главе, встречаются опечатки и неверные подписи к рисункам и таблицам. Например, на стр. 19 у функции $v(x,t)$, неправильный аргумент, нужно $v(x,\omega)$, неверная подпись к рис. 1.3 и подпись к таблице 4.4 (не $f=11$ МГц, а $f=1$ МГц).

Сделанные замечания не умаляют ценности диссертации и не влияют на положительную оценку представленных в работе исследований.

Заключение.

Диссертационная работа Ханазаряна Артура Дерениковича «Моделирование и исследование волновых процессов в упругих метаматериалах и слоистых волноводах с присоединенными элементами» выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой, в которой содержатся решения задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение.

Результаты диссертации актуальны и востребованы для теории и практики. Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» постановления правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Ее автор, Ханазарян Артур Дереникович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

«30» октября 2024 г.

Официальный оппонент

Соловьев Аркадий Николаевич

доктор физико-математических наук

(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),

доцент, профессор кафедры «Математики и физики»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», телефон: +7 (3652) 24-94-95,

<http://kipu-rc.ru>,

e-mail: solovievarc@gmail.com

адрес 295015, г. Симферополь, пер. Учебный, д. 8

Подпись А.Н. Соловьева удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета КИПУ

имени Февзи Якубова, кандидат технических наук,

доцент,



Сададин Асанович Феватов