

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.12,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.
Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО» МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26 декабря 2024 г. № 3

О присуждении Антонову Артему Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация « Дисперсионные свойства поверхностных волн Рэлея, распространяющихся на границах неклассических упругих полупространств» по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 24 октября 2024 г. (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.2.340.12, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Минобрнауки России, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, приказ № 71/нк от 26.01.2023.

Соискатель Антонов Артем Михайлович, 1992 года рождения, в 2015 году закончил специалитет Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по специальности «Механика».

В период с 01.11.2015 по 31.10.2019 Антонов А.М. обучался в очной аспирантуре Института проблем машиностроения РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук». Справка об обучении № 30-4001-105 от 10.09.2024, подтверждающая сдачу кандидатских экзаменов, выдана

Институтом проблем машиностроения РАН – филиалом Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук». В 2024 году Антонов А.М. прикреплен к кафедре Теоретической, компьютерной и экспериментальной механики института информационных технологий, математики и механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» для подготовки диссертации. Справка о сдаче кандидатского экзамена по Специальной дисциплине (научная специальность 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)) №060/А от 30.09.2024.

Антонов А.М. в период подготовки диссертации принимал участие в выполнении научных работ по:

– Программе фундаментальных научных исследований Государственных академий наук на 2013-2020гг. (Раздел 3 «Технические науки». Подраздел 30 «Методы анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий и новых человеко-машинных комплексов. Динамические и виброакустические процессы в технике»), тема 0055-2014-0002: «Развитие теории нелинейной волновой динамики и виброакустики машин и ее приложение к анализу устойчивости распределенных механических систем с высокоскоростными движущимися нагрузками, созданию методов и средств диагностики конструкций на ранних стадиях повреждения и разработке высокоэффективных адаптивных систем виброзащиты машин (руководитель: Ерофеев В.И.), № госрегистрации 01201458047;

– Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030) (Раздел 2 «Технические науки». Подраздел 2.3. «Механика и машиностроение»), тема FFUF-2021-0025: «Создание научных основ технологий повышения ресурса ответственных деталей и узлов машин и энергетических установок, работающих в условиях высоких механических, вибрационных и высокотемпературных нагрузок,

эрозионных и коррозионных сред, развитие методов нелинейной волновой динамики и неразрушающего контроля конструкционных материалов, виброзащиты машин и конструкций» (руководитель: Ерофеев В.И.);

– Гранту Правительства Российской Федерации (договор № 14.Y26.31.0031);

– Государственному заданию Минобрнауки РФ (базовая часть) (соглашение FSWR-2023-0036);

– Гранту Российского научного фонда по теме: «Динамика и устойчивость систем “грунт–рельсовая направляющая–высокоскоростной движущийся объект” с учетом эффектов излучения волн и накопления повреждений в материалах конструкций». Проект РНФ № 14-19-01637-Продление (2017-2018), ЦИТиС: АААА-А18-118102490078-7 (руководитель: Ерофеев В.И.);

– Грантам Российского фонда фундаментальных исследований:

- по теме «Нелинейные акустические волны в материалах и элементах конструкций с дефектами, неоднородностями и микроструктурой». Проект РФФИ № 20-38-70158- Стабильность (2019-2020), ЦИТиС: АААА-А20-120111390033-4 (руководитель: Мальханов А.О.);

- по теме «Исследование объемных и поверхностных волн в составных элементах конструкций на основе уточненных моделей для акустической диагностики механических неоднородностей при неразрушающем контроле изделий». Проект РФФИ № 16-38-00426 мол_а (2016) (руководитель: Архипова Н.И.).

В настоящее время Антонов А.М. работает в лаборатории физико-механических процессов Центра суперкомпьютерного моделирования Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ) министерства науки и высшего образования Российской

Федерации на кафедре Теоретической, компьютерной и экспериментальной механики (ТКЭМ) Института информационных технологий, математики и механики (ИИТММ) ННГУ и в Институте проблем машиностроения РАН – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» в лаборатории волновой динамики и экспериментальной механики.

Научный руководитель: Ерофеев Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Теоретической, компьютерной и экспериментальной механики Института информационных технологий, математики и механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Официальные оппоненты:

Глушков Евгений Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, Кубанский государственный университет, главный научный сотрудник Института математики, механики и информатики.

Кабалдин Юрий Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, руководитель НИЛ «Нанотехнологии в машиностроении» Института промышленных технологий машиностроения.

дали **положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» в своем **положительном** заключении, подписанном Поповым Виктором Сергеевичем, профессором кафедры «Прикладная математика и системный анализ», утвержденном проректором по науке и инновациям Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» Остроумовым Игорем Геннадьевичем указала, что Антонов Артем Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

При рассмотрении диссертационной работы на заседании кафедры «Прикладная математика и системный анализ» возник ряд вопросов и замечаний:

При рассмотрении диссертационной работы на заседании кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю.А. отмечен ряд вопросов и замечаний:

1. В описании второго основного результата, касающегося особенностей распространения поверхностных волн Рэлея вдоль свободной границы полупространства среды Коссера в редуцированной модели, отмечены особенности фазовой скорости поверхностной волны, но почему-то ничего не говорится о групповой скорости поверхностной волны, в то время как в 4-ом основном результате отмечается, что в модели с поврежденностью фазовая и групповая скорости ведут себя по-разному.

2. В работе рассмотрены волновые процессы в рамках неклассических моделей упругих сред: градиентно-упругой среды, редуцированной модели Коссера. однако не указано для каких конкретных материалов могут быть применены указанные модели и полученные результаты.

3. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности, например, на стр.29 находятся две формулы (1.15) и одна формула (1.16). Вторая формула (1.16) расположена на стр.32.

4. В первой позиции списка литературы автореферата допущена неточность, а именно, в качестве названия изданий указан журнал № Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана", но не указана серия данного издания.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ по теме диссертации. Из них в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и/или Web of Science, Scopus, опубликовано 9 работ. В материалах международных, всероссийских и региональных конференций опубликовано 6 работ. Также опубликована одна монография. В опубликованных работах результаты, вынесенные на защиту, получены соискателем. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации, входящие в Перечень ВАК Минобрнауки РФ и в базы Web of Science и/или Scopus:

1. **Антонов А.М.**, Ерофеев В.И. Волна Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства // Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2018. Т.79. №4. С.59-72. (ВАК, Scopus).

Вклад соискателя: решена задача о распространении поверхностных волн Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства, получено дисперсионное уравнение. Проведен анализ соотношения скоростей сдвиговых волн и поверхностных волн Рэлея, расчет и анализ амплитуд перемещений и напряжений в поверхностной волне от глубины ее проникновения.

2. **Антонов А.М.**, Ерофеев В.И., Шекоян А.В. Генерация возмущений сосредоточенным источником, движущимся с постоянной дозвуковой скоростью вдоль границы градиентно-упругого полупространства // Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т.80. №4. С.438-455. (ВАК).

Вклад соискателя: решена задача о распространении поверхностных волн Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства, генерируемых движущимся источником с постоянной дозвуковой скоростью. Проведен анализ амплитуд перемещений в поверхностной волне в зависимости от скорости движущегося источника возмущений.

3. **Антонов А.М.**, Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Влияние поврежденности материала на распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т.12. №3. С.293-300. (ВАК).

Вклад соискателя: решена самосогласованная задача, включающая в себя динамическое уравнение теории упругости и кинетическое уравнение накопления повреждений в материале среды, получено дисперсионное уравнение, проведен его анализ.

4. **Антонов А.М.**, Ерофеев В.И. Распространение волны Рэлея вдоль границы полупространства, описываемого упрощенной моделью Коссера // Проблемы прочности и пластичности. 2019. Т.81. №3. С.333-344. (ВАК).

Вклад соискателя: решена задача о распространении поверхностных волн Рэлея на границе полупространства, описываемого упрощенной моделью Коссе-ра, получено дисперсионное уравнение. Проведен анализ соотношения скоростей сдвиговых волн и поверхностных волн Рэлея, расчет и анализ амплитуд перемещений и напряжений в поверхностной волне от глубины ее проникновения.

5. **Antonov A.M.**, Erofeev V.I., Malkhanov A.O. Excitation of waves by a high-speed source moving along the border gradient-elastic half-space // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. Article ID: 032068. 4 pages. (Scopus).

Вклад соискателя: решена задача о распространении поверхностных волн Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства, генерируемых движущимся источником с постоянной сверхзвуковой скоростью.

6. **Antonov A.M.**, Erofeev V.I., Leonteva A.V. Influence of damage on the Rayleigh wave propagation along half-space boundary // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. Vol. 61. No 7. P.1174-1181. (WoS, Scopus).

Вклад соискателя: проведен анализ влияния поврежденности на характерные свойства распространения поверхностной волны Рэлея в самосогласованной задаче, включающей в себя динамическое уравнение теории упругости и кинетическое уравнение накопления повреждений в материале среды

7. **Antonov A.M.**, Erofeev V.I., Malkhanov A.O., Novoseltseva N.A. Excitation of the waves with a focused source, moving along the border of gradient-elastic half-space // Advanced Structured Materials. 2021. Vol.137 / Dynamics, Strength of Materials and Durability in Multiscale Mechanics / dell'Isola F., Igumnov L.A. (eds). Springer Nature Switzerland AG. Part of Springer Nature. P.17-40. (Scopus).

Вклад соискателя: изучены параметры конической поверхности (конуса Маха), образующейся при движении нормальной нагрузки со сверхзвуковой скоростью по полупространству, состоящему из градиентно-упругого материала. Проведен анализ амплитуд перемещений и напряжений в поверхностной волне в зависимости от скорости движущегося источника возмущений.

8. Erofeev V., **Antonov A.**, Leonteva A., Malkhanov A. Cosserat half-space (reduced model) and half-space of damaged materials // Advanced Structured Materi-

als. 2023. Vol.170 / Sixty Shades of Generalized Continua: Dedicated to the 60 th Birthday of Prof. Victor A. Eremeyev / Altenbach H., Berezovski A., dell'Isola F., Porubov A. (eds). Springer Nature Switzerland AG. Part of Springer Nature. P.171-190. (Scopus).

Вклад соискателя: проведен анализ основных характерных свойств распространения поверхностных волн Рэлея в полупространства редуцированной модели Коссера и полупространстве с поврежденностью материала.

9. **Антонов А.М.** О соотношении скоростей сдвиговых волн и поверхностных волн Рэлея для материалов, описываемых уравнениями механики обобщенных континуумов // Проблемы прочности и пластичности. 2024. Т. 86. № 4. (БАК, Scopus).

Вклад соискателя: исследованы поверхностные волны Рэлея, распространяющиеся в моделях градиентно-упругой среды и упрощенной (редуцированной) среды Коссера. Описана частотная зависимость их фазовых скоростей.

Основные результаты работы: решение задач о распространении поверхностных волн Рэлея на границах неклассических упругих полупространств: градиентно-упругая модель, модель редуцированной среды Коссера, модель с поврежденностью материала. Изучение и демонстрация дисперсионных свойств поверхностных волн Рэлея.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Отзыв **официального оппонента**, доктора физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), **Глушкова Евгения Викторовича**, профессора Кубанского государственного университета, главного научного сотрудника Института математики, механики и информатики. Отзыв на диссертацию положительный. Имеются вопросы и замечания:

1. Зависимости амплитуд напряжений в поверхностной волне от глубины, изображенные на рис.2.4 и 2.5, свидетельствуют о том, что кривые напряжений σ_{yy} , σ_{xy} и σ_{yx} ведут себя однотипно: всегда положительны и имеют локальный максимум. А вот поведение напряжений σ_{xx} принципиально иное - они могут принимать отрицательные значения и имеют локальный минимум. Аналогичное

справедливо и для рис.3.4. К сожалению, в диссертации отсутствует объяснение этого явления с физической точки зрения.

2. Не очень хорошо продуманы обозначения на протяжении всей диссертации. Так, параметр α , будучи волновым числом во 2-й главе, в третьей главе превращается сначала в новую упругую постоянную микрополярного материала (см.стр.13 автореферата), а далее (см.стр.14) становится постоянным параметром, характеризующим поврежденность материала и связь циклических процессов с процессами накопления повреждений. А еще в некоторых местах диссертации α - это индекс, обозначающий разные переменные.

Отзыв **официального оппонента**, доктора технических наук (05.03.01 – Процессы механической и физико-химической обработки, станки и инструмент), **Кабалдина Юрия Георгиевича**, профессора Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, руководителя НИЛ «Нанотехнологии в машиностроении» Института промышленных технологий машиностроения. Отзыв на диссертацию положительный. Имеются вопросы и замечания:

1. На стр. 87 сказано, что наличие комплексного дисперсионного уравнения (3.3), связывающего частоту и волновое число, однозначно требует, чтобы волновое число было комплексным. Но это не так. Возможны случаи, когда комплексной уместно выбирать частоту, а волновое число оставлять действительным (так принято при решении задач Коши), или, как это сделано в диссертации, при действительной частоте комплексным выбирать волновое число (так принято при решении краевых задач).

2. Последняя часть третьей главы посвящена обобщенному сравнительному анализу скоростей распространения волн в неклассических упругих полупространствах. Обобщенный сравнительный анализ других характеристик, например, компонент перемещений и напряжений, не приводится.

3. В тексте имеются опечатки. Например, на стр. 86 ротор вместо *rot* обозначен как *ror*.

На автореферат и диссертацию поступило 6 отзывов:

1. От доктора физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессора, члена-корреспондента РАН, главного науч-

ного сотрудника лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН **Буренина Анатолия Александровича**. Отзыв положительный. Имеются вопросы и замечания:

- Даже для подготовленного читателя автореферат представляет значительные сложности в ознакомлении с текстом. ряд основополагающих положений прописаны бегло, без дополнительных и необходимых пояснений, что существенно затрудняет чтение.

- Именно небрежностью объясняем некоторые неточности и повторения. Так, например, модуль сдвига с одной стороны μ (стр.11), с другой стороны G (стр.14).

- Предпосылок к изменению повреждаемости в квазистационарном процессе, по-видимому, нет. Но отметим, что это обстоятельство в автореферате существенно необходимо пояснить (уравнение переноса (3.2)).

2. От доктора физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), член-корреспондента РАН, главного научного сотрудника, заведующего отделом механики, математики и нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН» **Калинчука Валерия Владимировича** и от кандидата физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), ведущего научного сотрудника лаборатории динамики неоднородных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН» **Шейдакова Дениса Николаевича**. Отзыв положительный. Имеются вопросы и замечания:

- Из текста не ясно, какие именно компоненты тензора напряжений приведены в формуле (2.2)

- Греческой буквой α обозначается и волновое число (п.2.1), и микрополярная упругая константа (п.3.1), и параметр, характеризующий поврежденность

материала (п.3.2). Во избежание путаницы, для столь разных величин все-таки следовало использовать различные обозначения.

3. От доктора физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессора, профессора кафедры «Техническая физика и математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева» **Шоркина Владимира Сергеевича**. Отзыв положительный. Имеется замечание:

– В работе было бы уместным обосновать причины привлечения градиентной модели и модели микрополярной среды, учет ее поврежденности.

4. От кандидата технических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), руководителя направления по спецпроцессам АО «Нижегородский завод 70-летия Победы» **Зазнобина Виктора Александровича**. Отзыв положительный, замечания отсутствуют.

5. От кандидата физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), доцента кафедры «Общая физика и теоретическая механика», начальника отдела развития научной деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» **Ведяйкиной Ольги Ивановны**. Отзыв положительный. Имеются вопросы и замечания:

– В автореферате на стр.10 приведено уравнение (2.1). Однако пояснения обозначений, используемых в этом уравнении, приведены только после уравнений (2.3). Считаю необходимым их привести до уравнения (2.2)

– На стр.11 автореферата над рисунком 2.1 сказано: "Вычислена зависимость фазовой скорости поверхностной волны от волнового числа, проведено ее сравнение с дисперсионной характеристикой фазовой скорости объемной волны (Рисунок 2.1)". В действительности, на рисунке 2.1 приведены зависимости квадратов безразмерной скорости поверхностной волны и безразмерной фазовой скорости сдвиговой волны от волнового числа α , причем не указано, является ли волновое число α тоже безразмерным.

6. От кандидата технических наук (25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика), доцента кафедры механики грунтов и геотехники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» **Манько Артура Владимировича**. Отзыв положительный. Имеется замечание:

– На стр.16 даны общие фразы в заключении о достигнутых результатах, в то время как хотелось бы получить более развернутое заключение.

Все отзывы на автореферат диссертации **положительные**. В них отмечается актуальность исследования, новизна результатов, их научная и практическая значимость. Во всех отзывах делается вывод, что рассматриваемая диссертация соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а соискатель Антонов А.М, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией оппонентов и коллектива ведущей организации по тематике диссертационной работы, в частности, по динамике упругих и вязкоупругих тел применительно к проблемам скоростного транспорта, неразрушающего контроля и технологии машиностроения.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» – специализируется, в частности, на моделировании волновых процессов в элементах машин и конструкций.

Первый официальный оппонент – доктор физико-математических наук, профессор, Лауреат Государственной премии Российской Федерации Глушков Евгений Викторович – высококвалифицированный специалист в области волновой динамики неоднородных упругих сред. Автор монографий и статей в высокорейтинговых журналах по вопросам динамики деформируемых тел, неразрушающего контроля материалов и конструкций.

Второй официальный оппонент – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации Кабалдин Юрий Георгиевич – высококвалифицированный специалист по математическому моделированию самоорганизующихся процессов в технологических системах. Автор монографий и статей в высокорейтинговых журналах по исследованию колебаний и волн в механических системах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана процедура, базирующаяся на применении моделей механики обобщенных континуумов, позволяющая описывать дисперсию поверхностных волн Рэлея, наблюдающуюся экспериментально, но не описываемую классической теорией упругости;

предложены пути развития волновой динамики механических систем в части изучения особенностей распространения упругих поверхностных волн применительно к проблемам скоростного транспорта, неразрушающего контроля и технологии машиностроения;

доказана возможность:

1) определения дисперсионных характеристик поверхностных волн и расчета зависимости их амплитуд от расстояния от границы, свободной от напряжений, для: а) градиентно-упругого полупространства; б) полупространства среды Коссера (редуцированная модель);

2) исследования генерации поверхностных волн источником, движущимся вдоль границы градиентно-упругого полупространства: а) с постоянной скоростью, не превышающей значение скорости сдвиговой волны в материале; б) с постоянной скоростью, превышающей значение скорости сдвиговой волны в материале;

3) разработки самосогласованной двумерной математической модели, включающей в себя динамические уравнения теории упругости (уравнения Ламе) и кинетическое уравнение накопления повреждений в материале, позволяющей описывать распространение поверхностных волн вдоль свободной от

напряжений границы полупространства, материал которого содержит повреждения;

4) исследования (в рамках разработанной математической модели) дисперсионных и диссипативных свойств поверхностных волн, распространяющихся вдоль свободной от напряжений границы полупространства, материал которого содержит накопившуюся поврежденность.

введены новые представления, согласующиеся с известными экспериментами, о способности упругих поверхностных волн распространяться со скоростью, достигающей (согласно модели градиентно-упругой среды) и превышающей (согласно модели редуцированной среды Коссера) скорости сдвиговых волн в материале.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность расчета конической поверхности (конус Маха), образующейся вслед за источником генерации волны Рэлея для градиентно-упругого полупространства, несущего на себе движущуюся со сверхзвуковой скоростью нормальную нагрузку;

применительно к проблематике диссертации эффективно (с получением обладающих новизной результатов) **использованы** самосогласованные задачи, включающие в себя динамические уравнения теории упругости и кинетические уравнения накопления поврежденности в материале среды;

изложены аналитические и качественные методы анализа дисперсионных зависимостей применительно к решению задач динамики обобщенных континуумов, т.е. неклассических моделей деформируемых твердых тел;

раскрыты некоторые особенности формирования и поведения конуса Маха, образующегося при сверхзвуковом движении нормальной нагрузки вдоль границы градиентно-упругого полупространства, а именно: замечено, что при увеличении скорости источника возмущений, угол между образующими конуса и его осью уменьшается, при этом поперечная составляющая вектора перемещения превосходит продольную только в околоповерхностном слое полупространства;

изучены, для поверхностных волн Рэлея, условия проявления нормальной дисперсии (когда их фазовая скорость больше их групповой скорости) и аномальной дисперсии (когда их групповая скорость больше их фазовой скорости);

проведена модернизация представлений о распределении амплитуд напряжений в поверхностной волне.

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

разработаны и внедрены получение дисперсии и частотно-зависимого затухания поверхностных волн Рэлея, проведенного методами механики обобщенных континуумов (посредством включения в тексты сформированного ЗАО НИЦ КД и утвержденного Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации межгосударственного стандарта ГОСТ 35003-2023 «Техническая диагностика. Определение глубины трещин на поверхности стальных изделий ультразвуковым методом с использованием поверхностных волн. Общие требования» и первой редакции национального стандарта ГОСТ Р «Расчеты и испытания на прочность. Определение поврежденности и остаточного ресурса элементов конструкций, подвергаемых малоцикловым усталостным воздействиям, на основе акустических измерений. Общие требования»; шифр темы Программы национальной стандартизации 1.0.132-1.044.24);

определены условия и границы применимости методов линейной механики обобщенных континуумов для расчета дисперсионных характеристик упругих поверхностных волн Рэлея;

создан аналитический подход для решения задач волновой динамики градиентно-упругих деформируемых тел в части изучения особенностей распространения поверхностных волн различных частотных диапазонов;

представлены результаты исследования волновых процессов в упругих направляющих, взаимодействующих с движущимися объектами, позволяющие на этапе конструирования наземных транспортных средств проводить оценку энергозатрат на преодоление сил волнового сопротивления движению и вносить допустимые изменения в конструкции с целью их уменьшения.

Результаты исследований представляют интерес для организаций, в которых проводятся фундаментальные и прикладные исследования в области решения проблем скоростного транспорта, неразрушающего контроля и технологии машиностроения, в частности, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, а также для высших учебных заведений в учебном процессе – при чтении курсов лекций для студентов (Механико-математический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Институт информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на неклассических моделях деформируемых тел и механики поврежденных сплошных сред;

идея базируется на малости деформаций, вторых градиентов перемещений, вязких свойств материала, что позволяет рассматривать задачи в линейном приближении и искать их решения в виде бегущих гармонических волн;

использованы аналитические методы решения задач, адекватные рассматриваемым моделям, строго обоснованный математический аппарат механики сплошных сред, теории колебаний и волн;

установлено, что полученные качественные результаты позволяют объяснить некоторые наблюдаемые экспериментально, но не описываемые в рамках классической теории упругости свойства поверхностных волн Рэлея, такие как дисперсия и (или) частотно-зависимое затухание.

Личный вклад соискателя состоит в:

1. Получении и анализе дисперсионных уравнений для поверхностных волн Рэлея, распространяющихся вдоль свободных от напряжений границ полупространств, описываемых моделями обобщенных континуумов (градиентно-упругого; редуцированного микрополярного; содержащего накопленную поврежденность материала);

2. Анализе соотношения скоростей сдвиговых волн и поверхностных волн Рэлея для материалов, описываемых уравнениями механики обобщенных континуумов;

3. Расчете амплитуд перемещений и напряжений в поверхностной волне от глубины ее проникновения в материал деформируемого полупространства;

4. Изучении параметров конической поверхности (конуса Маха), образующейся при движении нормальной нагрузки со сверхзвуковой скоростью по полупространству, состоящему из градиентно-упругого материала.

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были. Соискатель Антонов А.М. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечания, в ряде случаев приведя собственную аргументацию.

На заседании 26.12.2024 диссертационный совет принял решение за развитие волновой динамики механических систем в части изучения особенностей распространения упругих поверхностных волн применительно к проблемам скоростного транспорта, неразрушающего контроля и технологии машиностроения, присудить Антонову А.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 15 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 11, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета



Игумнов Леонид Александрович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Белов Александр Александрович

26 декабря 2024 г.