

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)**

ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054
Телефоны: (8452) 99-88-11;
факс (8452) 99-88-10;
(8452) 99-86-03; факс (8452) 99-86-04
E-mail: sstu_office@sstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю.А.»,

доктор химических наук, профессор

Остроумов И.Г.



28 » 11 2024 г.

ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертационную работу
Антонова Артема Михайловича «Дисперсионные свойства
поверхностных волн Рэлея, распространяющихся на границах
неклассических упругих полупространств» на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»**

Актуальность темы диссертации. Поверхностные волны Рэлея широко используются в рамках решения задач скоростного транспорта и неразрушающего контроля. Однако в программное обеспечение основных современных технических устройств, в том числе в ультразвуковых дефектоскопах, заложено, что исследуемая среда – это классическая изотропная идеально упругая среда. Повышение точности при решении задач устойчивости движения высокоскоростных объектов, а также точности обнаружения поверхностных и околоповерхностных дефектов требует дополнительного изучения особенностей распространения поверхностных волн Рэлея в более сложных (неклассических) упругих средах.

Диссертационная работа посвящена исследованию свойств поверхностных волн Рэлея, распространяющихся на границах градиентно-упругого полупространства, полупространства среды Коссера (редуцированная модель) и полупространства, материал которого содержит повреждения.

В работе представлены исследования дисперсионных и диссипативных характеристик поверхностных волн, исследования генерации поверхностных волн

движущимся с постоянной скоростью источником, а также анализ амплитуд перемещений и напряжений. Приведены отличительные особенности свойств поверхностных волн Рэлея, распространяющихся в рассматриваемых неклассических средах, от классической изотропной идеально упругой среды.

Содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, содержащего 136 наименований и приложения в виде акта внедрения результатов диссертационной работы. Объем диссертации 112 стр.

Введение содержит обоснование актуальности, степень разработанности темы и краткий обзор публикаций по теме диссертации. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, методы исследования, достоверность результатов, а также основные положения работы, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе соискателя, а также сведения о содержании введения, глав и заключения.

В главе 1 приведен обзор основных типов упругих волн: объемных, поверхностных, волноводных и канализированных. Приведены уравнения движения и дисперсионные уравнения поверхностных волн. Продемонстрирована степень изученности свойств поверхностных волн Рэлея в классической упругой среде. Выполнен обзор литературы, содержащий основные результаты исследований по изучению закономерностей распространения поверхностных волн.

В п.1 главы 2 приводится постановка задачи о распространении поверхностных волн Рэлея в градиентно-упругой среде, основные этапы ее решения и качественный анализ полученных результатов. В данной модели в отличие от классической среды, появляются компоненты моментных напряжений, а тензор напряжений является несимметричным. В рамках решения задачи получено дисперсионное уравнение поверхностных волн, определены и проанализированы компоненты напряжений и перемещений частиц в волне. Установлено, что скорость поверхностной волны, распространяющейся в градиентно-упругом полупространстве, не может превосходить скорость объемной сдвиговой волны, так как фазовые скорости поверхностной и сдвиговой волн зависят от частоты и обладают дисперсией.

В п.2, 3 главы 2 рассматриваются задачи о возбуждении на границе градиентно-упругого полупространства колебаний движущимся источником с постоянной скоростью, не превышающей значение скорости сдвиговой волны в материале и с постоянной скоростью, превышающей значение скорости сдвиговой волны в материале. В рамках решения задачи показано, что на сверхзвуковых скоростях движения источника колебаний образуется конус Маха, отделяющий область возмущений от области покоя. Получены компоненты напряжений и

перемещений, амплитуды которых меняются в зависимости от величины нагрузки движущегося источника колебаний и его скорости. А поперечная составляющая вектора перемещения превосходит продольную только в околоповерхностном слое полупространства. Показано, что волны Рэлея обладают дисперсией в отличие от классических поверхностных волн Рэлея и способны вызывать вибрационные нагрузки разрушительной амплитуды.

В п.1 главы 3 рассматривается задача о распространении поверхностных волн Рэлея в полупространстве Коссера. В данной модели в отличие от классической среды тензор напряжений является несимметричным. Получено дисперсионное уравнение волны Рэлея и проведен его качественный анализ. Продемонстрирована способность поверхностных волн распространяться со скоростью, превышающей скорость сдвиговых волн в материале. Приведены графики изменения амплитуд смещений частиц, превосходящие амплитуды смещения частиц в классической среде.

В п.2 главы 3 разработана и решена самосогласованная задача распространения поверхностных волн Рэлея в среде с равномерно распределенной поврежденностью материала. Показано, что в данном случае волновое число является комплексным. Приведены анализ зависимостей действительной и мнимой частей волнового числа, фазовой и групповой скоростей от частоты при изменении параметра поврежденности. Показано, что при наличии поврежденности в среде поверхностные волны затухают в процессе распространения вдоль границы полупространства и обладают дисперсией, а в отсутствие поврежденности в среде поверхностная волна распространяется без дисперсии и затухания.

В п.3 главы 3 приводится анализ соотношения скоростей сдвиговых и поверхностных волн Рэлея в зависимости от частоты для классического и обобщенных упругих полупространств. Показано, что скорость распространения поверхностной волны в редуцированной среде Коссера превосходит скорости поверхностных волн как в классической, так и градиентно-упругой среде. При этом фазовая скорость сдвиговых волн в градиентно-упругой среде превосходит фазовую скорость сдвиговых волн в редуцированной среде Коссера во всем частотном диапазоне.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В приложении приведен акт внедрения результатов диссертационной работы в 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».

Основные научные результаты:

1. В рамках модели градиентно-упругой среды:

- установлена возможность распространения поверхностной волны со скоростью, достигающей скорость объемной сдвиговой волны при определенных значениях волнового числа;
- установлено, что при возбуждении колебаний движущимся источником со сверхзвуковой скоростью образуется конус Маха, содержащий в себе область распространения упругих волн, которая зависит от скорости движения источника возмущения;
- установлено, что при возбуждении колебаний движущимся источником со сверхзвуковой скоростью генерируются поверхностные волны, обладающие дисперсией и способные вызывать вибрационные нагрузки разрушительной амплитуды;
- установлено, что при возбуждении колебаний движущимся источником со сверхзвуковой скоростью поперечная составляющая вектора перемещения превосходит продольную только в околоповерхностном слое полупространства;
- установлено, что система с граничными условиями, выражающими отсутствие напряжений на границе полупространства, сводится к комплексному дисперсионному уравнению;
- установлено, что поверхностные волны затухают в направлении распространения, а низкочастотные возмущения обладают частотно-зависимой диссипацией и дисперсией, а глубина локализации волны увеличивается в сравнении с классическим случаем.

2. В рамках редуцированной модели Коссера:

- установлено, что фазовая скорость поверхностной волны во всем частотном диапазоне превосходит фазовую скорость сдвиговой волны;
- установлено, что поперечная и продольная компоненты амплитуд перемещений превосходят амплитуды перемещений поверхностной волны в классическом континууме;

3. В рамках модели полупространства с поврежденным материалом:

- разработана и решена самосогласованная задача распространения поверхностных волн Рэлея в среде с равномерно распределенной поврежденностью материала;
- установлено, что с уменьшением значения коэффициента поврежденности, в области высоких частот, значение фазовой скорости растет, а групповой падает. На очень низких частотах значения фазовой и групповой

скоростей растут при снижении коэффициента поврежденности;

– установлено, что система с граничными условиями, выражающими отсутствие напряжений на границе полупространства, сводится к комплексному дисперсионному уравнению;

– установлено, что поверхностные волны затухают в направлении распространения, а низкочастотные возмущения обладают частотно-зависимой диссипацией и дисперсией.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на строгом применении методов механики сплошных сред, что подтверждается положительными результатами апробации работы в Научно-исследовательском центре контроля и диагностики технических систем, а также согласованностью выводов диссертации с другими экспериментальными данными.

Апробация работы.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на профильных всероссийских и международных научных конференциях (2015-2024гг.), а также работа была обсуждена на семинаре Института проблем машиностроения РАН – филиала Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук (апрель 2024) и на объединенном заседании кафедры Теоретической, компьютерной и экспериментальной механики и Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (октябрь 2024).

Значимость основных результатов для науки и практики и рекомендации по их использованию.

Результаты диссертационной работы уже включены в тесты 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». Также результаты работы могут быть применены при разработке других методик, использующих поверхностные волны для решения проблем скоростного транспорта (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, г. Санкт-Петербург; Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской области) и неразрушающего контроля (НИИ интроскопии МНПО «Спектр», г. Москва; Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова РАН, г. Нижний Новгород). Помимо этого, полученные результаты могут быть использованы для

составления курса лекций студентам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

Публикации, отражающие основное содержание работы.

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 9 из них в журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ, в журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы и ее основные результаты.

Замечания по диссертационной работе и автореферату.

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-м 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 издания указан журнал «Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана», но не указана серия данного издания.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе и не носят принципиального характера. Общие выводы диссертации соответствуют содержанию проделанной работы.

Заключение. В целом, представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи эволюции дисперсионных поверхностных волн Рэлея на границах неклассических упругих полупространств, которая имеет важное значение для развития механики деформируемого твердого тела, выполненной соискателем самостоятельно на высоком научном уровне, соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Основное содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности, а ее автор, Антонов Артем Михайлович, полностью заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Прикладная математика и системный анализ» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», протокол № 7 от 21.11.2024 г.

Председательствующий, профессор кафедры
«Прикладная математика и системный анализ»
СГТУ имени Гагарина Ю.А., д.т.н., профессор



В.С. Попов

28.11.2024

Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Адрес: 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Телефон: +7 (8452) 99-88-11

E-mail: rectorat@sstu.ru

Официальный сайт: <https://www.sstu.ru>

Подпись <u>Попов В.С.</u>
Заместитель начальника управления кадров
<u>11</u> <u>Март</u> <u>2024</u> г.

