

## УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе и  
международной деятельности  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Донской государственной  
технической университет»,  
доктор технических наук, профессор  
Бескопильный Алексей Николаевич



« 20 » *января* 2025 г.

## ОТЗЫВ

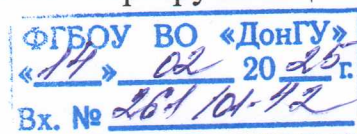
ведущей организации на диссертацию

Глухова Антона Александровича

«Локализованные и нормальные упругие волны в анизотропных функционально-градиентных телах с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

Тема диссертационной работы А.А. Глухова связана с решением актуальной научной проблемы разработки специализированных численно-аналитических методов изучения деформационных процессов в анизотропных непрерывно-неоднородных функционально-градиентных средах. Важность исследований по этой проблематике обусловлена интенсивным развитием аддитивных технологий создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками, достигаемыми за счет особенностей структурной неоднородности. Тематическое направление в области анализа моделей распространения упругих волн в непрерывно-неоднородных телах и элементах конструкций является важной составной частью этих исследований, поскольку их результаты востребованы в таких высокотехнологичных научно-промышленных отраслях, как твердотельная акустоэлектроника, технологии неразрушающего





ультразвукового контроля, динамика машин, приборов сооружений, геоакустика и инженерная сейсмика. Это направление механико-математического моделирования включает исследования, базирующиеся на задании свойств неоднородности путем использования экспоненциальных функций и дальнейшую разработку методов решения задач о распространении локализованных и нормальных упругих волн в анизотропных функционально-градиентных телах с данным типом неоднородности. При этом, к числу преимущественно открытых важных проблем в данной области принадлежат описание процессов распространения обобщенных поверхностных упругих волн в анизотропных полубесконечных функционально-градиентных телах, характеризующихся наличием приповерхностно локализованных зон выраженной неоднородности материалов с асимптотическим сглаживанием функций изменения их характеристик при отходе от границ вглубь рассматриваемых полубесконечных тел, описание процессов распространения нормальных сдвиговых и продольно-сдвиговых упругих волн в волноводе в виде функционально-градиентного анизотропного упругого слоя с учетом многофакторной экспоненциальной неоднородности – заданием различных экспоненциальных функциональных законов изменения для различных характеристик физико-механических свойств анизотропных материалов. В контексте этих соображений, тема диссертационной работы А.А. Глухова, посвященной исследованиям по вышеуказанным проблемам механики деформируемого твердого тела, является актуальной в фундаментально-научном и прикладном аспектах.

#### **Связь работы с планами соответствующих отраслей науки.**

Как указано в тексте диссертационной работы и автореферате, представленные в ней исследования осуществлялись в рамках финансируемых проектов – проекта «Методы исследования линейных и нелинейных моделей статического и динамического деформирования анизотропных функционально-градиентных упругих тел», выполнявшегося по заказу Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики и проекта «Численно-аналитические методы исследования волнового деформирования, ползучести, концентрации напряжений и сопряжённых полей в новых классах анизотропных композитных и функционально-градиентных сред», выполняемого по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Тематика и содержание диссертационного исследования также отвечают «Приоритетным направлениям фундаментальных и поисковых научных исследований» (позиции



1.1.2.5. Численные методы решения задач математического моделирования и 2.3.1.3. Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред) и позициям Указа Президента Российской Федерации № 529 от 18.06.2024 г. «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» (Перечень важнейших наукоемких технологий. II. Сквозные технологии. 23. Технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками).

### **Научная новизна полученных результатов.**

В рамках реализации целей и задач диссертационного исследования в нем получены следующие новые научные результаты в области механико-математического моделирования:

1. Осуществлены разработка и апробация новой механико-математической модели описания эффектов наличия локализованных зон приповерхностной однофакторной неоднородности физико-механических свойств материалов полубесконечных анизотропных функционально-градиентных тел с использованием двойных экспоненциальных функций.

2. С применением итерационной аналитической методики в скалярных и векторных экспоненциальных рядах получены базисные частные решения амплитудных волновых обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами и систем уравнений указанного типа для моделей распространения обобщенных поверхностных упругих волн SH типа, P-SV типа и произвольно ориентированных трехпарциальных поверхностных волн в полубесконечном трансверсально-изотропном и ортотропном функционально-градиентном массиве с описываемой двойными экспоненциальными функциями приграничной локализованной зоной неоднородности.

3. С применением итерационной аналитической методики в экспоненциальных рядах получены базисные частные решения амплитудных волновых обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, описывающих распространение сдвиговых нормальных упругих волн в функционально-градиентном слое рамках моделей двухфакторной экспоненциальной неоднородности трансверсально-изотропной функционально-градиентной среды.



4. Разработана аналитическая методика интегрирования амплитудных волновых обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, описывающих распространение нормальных сдвиговых упругих волн в слое в рамках моделей общей трехфакторной экспоненциальной неоднородности трансверсально-изотропной функционально-градиентной среды.

5. Осуществлен теоретический и численный анализ моделей распространения обобщенных поверхностных волн Лява в составных структурах «однородный изотропный слой на неоднородном анизотропном полупространстве», «функционально-градиентный анизотропный слой на однородном анизотропном полупространстве», «функционально-градиентный экспоненциально-неоднородный анизотропный слой на неоднородном анизотропном полупространстве», а также модели распространения обобщенных поверхностных волн рэлеевского типа с использованием описания локализованных зон неоднородности функционально-градиентных материалов полупространств двойными экспоненциальными функциями.

6. Реализован теоретический и численный анализ моделей распространения локализованных сдвиговых волн в однородном анизотропном слое, а также локализованных сдвиговых и продольно-сдвиговых волн в анизотропном слое с симметричным законом поперечной экспоненциальной неоднородности между однотипными функционально-градиентными трансверсально-изотропными полупространствами с описываемыми двойными экспоненциальными функциями зонами приповерхностной неоднородности.

7. Получены и исследованы отдельные варианты дисперсионных соотношений для нормальных сдвиговых волн в трансверсально-изотропном упругом слое с альтернативными вариантами двухфакторной экспоненциальной физико-механической неоднородности, а также в трансверсально-изотропном слое с общей трехфакторной экспоненциальной физико-механической неоднородностью.

8. Описан и систематизирован ряд новых физико-механических закономерностей влияния факторов анизотропии и неоднородности функционально-градиентных материалов волноводов для обобщенных поверхностных волн Лява и Рэлея, а также нормальных волн в анизотропном функционально-градиентном слое на дисперсионные, кинематические, силовые и энергетические характеристики волн исследуемого типа.



## **Обоснованность и достоверность сформулированных в диссертации научных положений и выводов.**

Обоснованность вынесенных на защиту положений диссертационной работы в полной мере следует из процесса и результатов проведенных исследований, оценки направлений и перспектив их использования.

Так правомерным является заключение об эффективности использования модели описания приповерхностной зоны однофакторной неоднородности функционально-градиентного анизотропного полупространства с применением двойных экспоненциальных функций для численно-аналитического исследований закономерностей влияния факторов вариации значений параметров деформационных свойств и плотности анизотропного материала полупространства на дисперсионные, кинематические и энергетические характеристики обобщенных поверхностных упругих волн, что представляет значительный прикладной интерес для расчетного проектирования технологий и компонентов акустоэлектронной техники и схем реализации сейсмоакустических исследований.

Реализованные исследования также свидетельствуют о том, что построенные решения амплитудных уравнений моделей распространения обобщенных поверхностных упругих волн SH и P-SV типа в полубесконечных анизотропных функционально-градиентных телах с описываемой двойными экспоненциальными функциями поперечной локализованной физико-механической неоднородностью эффективно применимы для вычислительного анализа комплекса свойств обобщенных волн Лява и Рэлея, что также представляет интерес для инженерных приложений в прочностных расчетах, геоакустике и ультраакустической диагностике, твердотельной акустоэлектронике.

Справедливо вынесенное на защиту утверждение о том, что дисперсионные уравнения, полученные при исследовании локализованных волн SH и P-SV типа в однородном анизотропном слое и анизотропном слое с симметричным экспоненциальным законом поперечной неоднородности, расположенными между однотипными функционально-градиентными полупространствами с приграничными зонами неоднородности, а также результаты расчетного анализа кинематических, силовых и энергетических характеристик этих волн, являются весомым вкладом в фундаментальные представления о влиянии факторов неоднородности и анизотропии на параметры соответствующих волновых процессов и инструментом повышения точности прикладных исследований в области шахтной сейсמודиагностики пластов полезных ископаемых.



Корректно и заключение о том, что разработанные и апробированные методики получения дисперсионных уравнений для моделей распространения нормальных SH и P-SV волн в анизотропном слое с альтернативными вариантами двухфакторной и с общей трехфакторной экспоненциальной физико-механической неоднородностью наряду с вкладом в базу фундаментальных знаний об особенностях волновых процессов в функционально-градиентных средах имеют важное прикладное значение для совершенствования инженерных расчетов в динамике нанокompозитных конструкций, при проектировании волноводных компонентов устройств радиоэлектроники и акустической диагностики.

В целом, достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается строгостью и корректностью постановок рассматриваемых задач на основе обоснованных и апробированных моделей динамической теории упругости анизотропного тела; использованием в исследованиях верифицированных математических методов теории обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференциальных уравнений в частных производных и уравнений математической физики; обоснованием сходимости представлений в экспоненциальных функциональных рядах для отдельных базисных решений волновых уравнений; использованием в численных исследованиях апробированных алгоритмов решения трансцендентных уравнений; сопоставительной проверкой согласованности в предельных частных случаях некоторых полученных разработанными методами результатов работы и опубликованных результатов исследований других авторов.

### **Значимость результатов для науки и практики.**

Значение результатов работы для фундаментальной науки заключается в расширении класса актуальных проблем механико-математического моделирования в волновой динамике деформируемого твердого тела, проблем изучения свойств локализованных и нормальных упругих волн в анизотропных функционально-градиентных телах с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа, для решения которых разработаны и успешно применены эффективные численно-аналитические методы исследования. Решены ранее не исследованные фундаментальные задачи о спектрах и свойствах обобщенных поверхностных волн Лява и Рэлея в полубесконечных функционально-градиентных телах с приграничной неоднородностью физико-механических характеристик, задачи описания свойств локализованных волн сдвигового и продольно-сдвигового типа в составных структурах в виде упругого слоя между деформируемыми полупространствами при учете свойств непрерывной неоднородности и



анизотропии для составляющих указанной структуры, а также задачи описания свойств нормальных упругих волн в анизотропном функционально-градиентном слое с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа. Описан ряд новых, обусловленных факторами непрерывной неоднородности фундаментальных закономерностей в трансформации свойств исследуемых волн.

В практическом плане результаты исследования в виде разработанных численно-аналитических методов, алгоритмов их компьютерной реализации, описанных свойств анализируемых волновых процессов, могут быть непосредственно использованы в предпроектном моделировании и конструкторских прочностных расчетах деталей машин и элементов строительных конструкций из анизотропных функционально-градиентных материалов, в геоакустических исследованиях, в технологиях неразрушающего ультразвукового контроля, в расчетах, связанных с разработкой акустоэлектронных компонентов радиотехнических устройств.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в теоретических и прикладных научных исследованиях по проблемам динамического деформирования анизотропных функционально-градиентных упругих сред в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Южном федеральном университете, Донском государственном техническом университете, Сибирском федеральном университете, Пермском национальном исследовательском университете, Кубанском государственном университете, а также в исследованиях по проблемам распространения сейсмических волн в неоднородных геомассивах в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк.

Результаты и выводы работы также создают базу для перспективных научных исследований в области разработки численно-аналитических методов исследования моделей распространения локализованных и нормальных термоупругих, электроупругих и магнитоупругих волн в пьезоэлектрических и пьезомагнитных анизотропных функционально-градиентных телах с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа, о чем указано в работе.



### **Оценка содержания диссертации и ее завершенности.**

Работа в целом имеет принятую для диссертационных исследований структуру, состоит из введения, пяти предметных разделов, заключения, списка использованных источников из 219 наименований.

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, предмет, объект и охарактеризованы методы проведения исследований, новизна полученных результатов, вынесенные на защиту положения, теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

В первом разделе работы дан аналитический обзор публикаций по теме работы, представлены модели описания физико-механических свойств функционально-градиентных деформируемых сред и сформулированы ключевые методические положения исследования. Во втором разделе представлено решение задач аналитического интегрирования уравнений стационарной волновой динамики для исследуемых моделей в функциональных рядах. Третий подраздел посвящен исследованиям моделей распространения обобщенных поверхностных упругих волн Лява и Рэлея в анизотропных функционально-градиентных полубесконечных телах с приграничными локализованными областями выраженной неоднородности. Четвертый подраздел содержит исследования моделей распространения сдвиговых и продольно-сдвиговых локализованных волн в составных телах из анизотропного функционально-градиентного деформируемого слоя между анизотропными упругими полупространствами с приграничными локализованными областями выраженной неоднородности. В пятом разделе работы реализовано исследование моделей распространения нормальных упругих волн сдвигового и продольно-сдвигового типа в функционально-градиентном трансверсально-изотропном слое с экспоненциальной многофакторной неоднородностью физико-механических свойств.

Общая совокупная оценка структуры, содержания и ведущих научных результатов диссертационной работы позволяют сделать вывод о полноте реализации поставленных целей и сформулированных задач исследования, что свидетельствует о ее логической завершенности.

### **Соответствие паспорту научной специальности**

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела по следующим тематическим пунктам: 3. Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости; 4. Механика композиционных материалов и конструкций, механика



интеллектуальных материалов; 8. Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры; 12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат правильно и в полном объеме отражает основные положения и результаты диссертационной работы.

#### **Апробация работы и публикация основных результатов диссертации в научной печати**

Представленные в диссертации материалы исследований доложены на 9 Международных и 3 Всероссийских научных конференциях, а также на двух профильных научных семинарах. Опубликованные работы по теме диссертации в достаточной степени отражают ее содержание и основные полученные автором результаты. Материалы диссертации опубликованы в 22 работах, в том числе в 11 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России (4 статьи в журналах, непосредственно представленных в перечнях ВАК РФ, и 7 статей в рецензируемых изданиях ДНР, включенных в перечень согласно письму Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 19 апреля 2023 г. № МН-3/3658 «О рецензируемых научных изданиях» в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 марта 2023 г. № 415), а также 11 в публикациях в прочих изданиях, что соответствует требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней».

#### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Материал диссертации логично и грамотно изложен, к оформлению работы существенных претензий нет. По содержанию диссертационного исследования имеются следующие замечания:

1. Не для всех базисных частных решений амплитудных уравнений рассматриваемых моделей волновых процессов, построенных во втором разделе диссертационной работы в экспоненциальных либо степенных скалярных и векторных рядах, дано обоснование сходимости.

2. Теоретические исследования для отдельных рассмотренных в диссертации моделей распространения локализованных и нормальных упругих волн в анизотропных функционально-градиентных телах с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа не дополнены численным анализом дисперсионных, кинематических и энергетических свойств волновых движений.



3. При расчетном анализе полученных дисперсионных уравнений осуществлялось исследование только отвечающих действительным ветвям их корней бегущих локализованных и нормальных волн, а исследование ветвей мнимых и комплексных корней для мод краевых стоячих волн не проводилось.

4. Замечанием по стилю изложения полученных результатов является использование в ряде случаев длинных сложно воспринимаемых предложений.

Приведенные замечания не носят принципиальный характер при формировании общей положительной оценки уровня и содержания работы, не касаются значимости ведущих теоретических и практических результатов диссертационного исследования.

#### **Личный вклад автора**

Все основные теоретические и численные результаты диссертационного исследования, в том числе проведение исследований и интерпретация полученных результатов, принадлежат лично соискателю. В совместно опубликованных работах соавторам принадлежат участие в постановке рассматриваемых задач, рекомендации по схемам их анализа, направлениям обобщения и практического применения полученных результатов, а также рекомендации по разработке программных приложений для осуществления численных экспериментов на базе предложенных методов, по обработке и систематизации их результатов. Четыре статьи из списка работ по теме диссертации опубликованы А.А. Глуховым без соавторов.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

На основании анализа содержания диссертационной работы Глухова А.А. «Локализованные и нормальные упругие волны в анизотропных функционально-градиентных телах с разнофакторной неоднородностью экспоненциального типа» и автореферата диссертации можно заключить, она является выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне и имеющей важное фундаментальное и прикладное значение завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно осуществлена разработка и апробация комплекса специализированных численно-аналитических методов теоретического исследования спектров и свойств локализованных и нормальных упругих волн в анизотропных функционально-градиентных телах с описываемой двойными



экспоненциальными функциями приповерхностной неоднородностью и многофакторной неоднородностью экспоненциального типа, а также компьютерная реализация разработанных методов и проведение численных исследований ведущих закономерностей в структуре и свойствах анализируемых волновых полей. Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Глухов Антон Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв подготовлен доктором физ.-мат. наук, профессором кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет» Соловьевым Аркадием Николаевичем

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет», протокол № 6 от «16» января 2025 года.

И.О., заведующего кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Донской государственной технической университет»,

Кандидат физ.-мат. наук,

Панфилов Иван Александрович

Профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

доктор физ.-мат. наук, доцент

Соловьев Аркадий Николаевич

Подпись гр. *И.А. Панфилов*  
**УДОСТОВЕРЯЮ**  
Начальник управления кадров  
*И.И. Костина*  
*29.01.2025*

