

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ефимова Дмитрия Юрьевича
«Дифракция звуковых волн на неоднородных упругих телах
цилиндрической формы»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Многие реальные объекты и элементы конструкций можно достаточно хорошо моделировать телами цилиндрической формы. Результаты исследований дифракции звука на телах цилиндрической формы представляют как самостоятельную ценность, так и служат основой для анализа рассеяния звука на телах более сложной геометрии. В настоящее время известно большое количество публикаций отечественных и зарубежных авторов, посвященных дифракции звука на упругих цилиндрах. В большинстве этих работ рассматриваются цилиндрические тела бесконечной протяженности и расположенные в безграничном пространстве. В то же время, задачи дифракции звуковых волн на цилиндрических телах конечной длины, а также на цилиндрах, расположенных вблизи ограничивающих поверхностей изучены в значительно меньшей степени. При изучении дифракции звуковых волн на цилиндрических телах важной проблемой является достижение требуемых звукоотражающих характеристик таких тел с помощью специальных покрытий.

Диссертация Ефимова Дмитрия Юрьевича посвящена изучению влияния изотропных и анизотропных радиально-неоднородных покрытий цилиндрических тел бесконечной и конечной протяженности, расположенных как в безграничном пространстве, так и в присутствии ограничивающих поверхностей. Такие исследования имеют важное теоретическое и практическое значение, что обуславливает **актуальность** темы диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен подробный обзор работ по проблеме исследования и представлены математические модели распространения малых возмущений в идеальной жидкости и в упругих средах (изотропной и анизотропной, однородной и непрерывно-неоднородной).

Во второй главе получены аналитические решения задач дифракции звуковых волн на неоднородных упругих цилиндрах, расположенных в безграничном пространстве. В качестве рассеивателя рассмотрены однородный цилиндр с неоднородным покрытием и неоднородный цилиндрический слой. Первичное волновое возмущение генерирует линейный источник. Были рассмотрены две конфигурации расположения линейного источника

относительно цилиндрического рассеивателя: параллельное расположение осей источника и цилиндра и непараллельное расположение осей, при котором они не лежат в одной плоскости. Волновые поля в граничащей с цилиндром идеальной жидкости, а также в однородном цилиндре записываются через базисные решения уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах. Определение поля смещения в неоднородном упругом цилиндрическом слое сведено к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Приближенное аналитическое решение этой краевой задачи получено методом сплайн-коллокации с использованием аппарата кубических *B*-сплайнов.

Представлены результаты численных расчетов задач рассеяния звуковых волн цилиндрическими телами с однородной и неоднородной структурой. Проведен сравнительный анализ угловых и частотных зависимостей рассеянного звукового поля, который показал, что неоднородность материала оказывает существенное влияние на характеристики рассеяния звука.

В третьей главе рассмотрены задачи о рассеянии звуковых волн (плоских, цилиндрических, сферических) упругим цилиндром с неоднородным покрытием, расположенным в присутствии ограничивающей плоской поверхности: идеальной (абсолютно жесткой или акустически мягкой) и упругой. Решение задачи в случае, когда поверхность является идеальной, а падающая волна — плоской, получено с использованием метода мнимых источников. При этом исключается из рассмотрения подстилающая плоскость путем введения второго цилиндра и второй волны, являющихся зеркальным отражением исходных рассеивателя и падающей звуковой волны. Решения задач для случаев, когда первичное звуковое поле генерируется линейным и точечным источниками, а подстилающая поверхность является упругой, основаны на использовании интегрального уравнения Гельмгольца-Кирхгофа. Учет многократных переотражений между цилиндром и границей полупространства достигался при помощи специально построенной функции Грина для упругого полупространства. Приведены результаты численных исследований распределения амплитуды рассеянного акустического поля. Расчеты проведены как для цилиндров, расположенных в присутствии ограничивающих поверхностей, так и в безграничном пространстве. Оценено влияние присутствия подстилающей поверхности на рассеянное поле.

В четвертой главе решены задачи дифракции звуковых волн на однородном изотропном упругом цилиндре с упругим неоднородным трансверсально-изотропным покрытием. Рассмотрены задачи дифракции звуковых волн с криволинейным фронтом распространения (цилиндрических и сферических) на цилиндре, расположенном в безграничном пространстве. Проведенные численные исследования выявили влияние учета криволинейности фронтов падающих цилиндрических и сферических волн на рассеяние звука. Получено решение задачи дифракции плоской звуковой волны на цилиндре, находящемся вблизи идеальной поверхности (абсолютно жесткой и акустически мягкой). Автором применен приближенный метод решения, основанный на учете

рассеяния цилиндром только первичной падающей плоской волны и волны, отраженной от плоскости.

В данной главе также рассматриваются обратные задачи дифракции, целью которых является определение таких квадратичных законов радиальной неоднородности трансверсально-изотропного упругого покрытия упругого цилиндра, которые минимизируют интенсивность рассеянного акустического поля в заданных частотном диапазоне и угловом секторе. Метод основан исключительно на решении прямых задач и не требует экспериментальных замеров акустических откликов. Представлены результаты численных расчетов обратных задач, выполненные на базе решений прямых задач дифракции цилиндрической звуковой волны на цилиндре, расположенном в безграничном пространстве, и плоской звуковой волны на цилиндрическом теле, находящемся вблизи подстилающей поверхности. Показано, что совместное влияние анизотропии и неоднородности материала покрытия позволяет эффективно изменять звукоотражающие свойства цилиндрического тела.

Пятая глава посвящена задачам дифракции на телах цилиндрической формы конечной протяженности. Рассмотрены задачи дифракции плоской и цилиндрической звуковых волн упругим цилиндром конечной длины с неоднородным покрытием. Представлены результаты численных расчетов угловых и частотных характеристик рассеянного поля для разных значений длины цилиндрического тела. Расчеты проведены для упругих цилиндров без покрытий, с однородными покрытиями и неоднородными покрытиями, механические характеристики которых менялись по различным линейным и квадратичным законам. Получены решения задач рассеяния плоской звуковой волны неоднородным цилиндрическим слоем, расположенным как в безграничном пространстве, так и в присутствии идеальной поверхности. Изучено влияние неоднородности цилиндрических тел различной протяженности на дифракционную картину.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

В диссертационной работе также приведено **приложение**, которое содержит свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработанных автором для проведения численных исследований.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. В задаче, рассмотренной в разделе 2.1, представляется естественным координатную ось Ox изначально направить к оси источника возмущений (угол «фи» с индексом ноль при этом будет равным нулю) для упрощения математических построений. По-видимому, автор так не поступил для удобства в дальнейшем сравнения решения данной задачи с решениями задач при наличии подстилающей плоскости из последующих разделов. В любом случае следовало бы дать пояснение к произвольному выбору направления оси Ox в разделе 2.1.

2. В 3.1 методом мнимых источников решена задача рассеяния наклонно падающей плоской звуковой волны упругим цилиндром с неоднородным покрытием, находящимся вблизи идеальной поверхности. В 3.2 методом

функций Грина исследована дифракция цилиндрической звуковой волны на таком же цилиндре, расположенном вблизи упругой границы. При этом в 3.2 автор указывает, что используемый подход позволяет рассматривать не только упругую границу полупространства, но и идеальные границы, и из решения задачи дифракции цилиндрических волн можно получить решение для случая, когда падающая волна является плоской. Считаю, что было бы полезным в 3.2 получить решение для случая падающей плоской волны, полагая поверхность идеальной, и сравнить результаты, с результатами, полученными в 3.1.

3. При решении обратных задач в разделах 4.1.2 и 4.3.2 следовало бы пояснить, исходя из чего автор аппроксимирует физико-механические параметры неоднородного покрытия цилиндра именно многочленами второй степени, а не какими-либо другими функциями.

4. В 4.1.2 и 4.3.2 автор осуществляет математическое моделирование непрерывно-неоднородных упругих покрытий упругого цилиндра, обеспечивающих наименьшее отражение звука. Результаты, рассчитанные для цилиндров с покрытиями, имеющими оптимальные звукоотражающие свойства, сравниваются с результатами, рассчитанными для упругого цилиндра без покрытия. Однако, автор не сравнил эти результаты с результатами для цилиндра, имеющего однородное упругое покрытие, что было бы интересным.

5. В разделе 5.1.1 сказано, что краевые условия на торцах цилиндра в виде (5.1.7) для соответствующих перемещений, изгибающих моментов и продольных усилий сводятся к краевым условиям в виде (5.1.8) для перемещений и напряжений. Однако, строго говоря, из (5.1.7) условия (5.1.8) не следуют. Наоборот, если выполнены условия (5.1.8), то из этого следует выполнение условий (5.1.7). Поскольку автор строит решение задачи именно с условиями на торцах цилиндра в форме (5.1.8), то про условия (5.1.7) можно было не говорить вообще, или же упомянуть их лишь в связи с тем, что они становятся физически значимыми только когда длина цилиндра существенно превосходит его радиус.

6. В тексте работы помимо опечаток иногда встречается не совсем удачная терминология. Так, например, в главе 5 наряду с термином «цилиндрический слой» употребляется термин «оболочка», который видится не вполне уместным. В той же главе 5 термин «жесткие неподвижные экраны» недостаточно отражает специфику граничных условий на торцах цилиндра конечной длины.

Сделанные замечания не снижают научной ценности диссертации, которая содержит решения задач математического моделирования и численного исследования процессов дифракции звуковых волн на неоднородных упругих телах цилиндрической формы.

Проведенные автором исследования опираются на классические модели гидродинамики идеальной жидкости и линейной теории упругости. Эффективность предложенных методов решения рассмотренных прямых и обратных задач дифракции подтверждена решением ряда модельных примеров. Все это обеспечивает **достоверность** результатов, полученных в диссертации.

Анализ известных к настоящему дню публикаций по теме диссертационного исследования позволяет сделать вывод о том, что полученные автором результаты являются **новыми** и вносят вклад в область динамики неоднородных тел.

Представленные результаты имеют важное значение как для развития теории динамического взаимодействия деформируемых твердых тел с акустической средой, так и для практических приложений.

Публикации автора, апробация и автореферат полностью отражают результаты, изложенные в диссертации. Для проведения численных исследований автором разработаны программы для ЭВМ, на которые получено 2 свидетельства о государственной регистрации.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ефимов Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ:

Доктор физико-математических наук, доцент/старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории 202 (динамических испытаний) НИИ механики ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова»

ПШЕНИЧНОВ Сергей Геннадиевич



24.04.2025

Специальность ВАК: 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1.

Телефон: +7(916) 371-98-82

E-mail: serp56@yandex.ru

Подпись Пшеничнова Сергея Геннадиевича заверяю.

Ученый секретарь НИИ механики ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова»

Рязанцева Марина Юрьевна



ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ефимова Дмитрия Юрьевича на тему «ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА НЕОДНОРОДНЫХ УПРУГИХ ТЕЛАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертационной работы Ефимова Д.Ю., посвященной исследованию дифракции звуковых волн на неоднородных упругих телах цилиндрической формы, обусловлена широким использованием теории дифракции при решении задач взаимодействия акустических волн в жидкости с упругими телами различной конфигурации.

Научная новизна. В рассматриваемой работе разработана математическая модель дифракции гармонических звуковых волн на неоднородных упругих телах, соприкасающихся или окруженных идеальными жидкостями. Поставлены и решены прямые и обратные задачи дифракции гармонических звуковых волн на цилиндрических упругих телах различной неоднородной структуры. Таким образом, получила развитие теория дифракции звуковых волн на неоднородных упругих телах, граничащих с идеальными жидкостями.

Практическая значимость. Полученные результаты в виде аналитических зависимостей и разработанные программы могут быть использованы в различных проектных организациях при проектировании промышленных материалов и конструкций с требуемыми звукоотражающими свойствами, в гидроакустике для звуковой эхолокации различных объектов, в дефектоскопии для разработки методов неразрушающего контроля, а также в медицине при разработке методов ультразвуковой диагностики.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 181 страницах, содержит список использованных источников из 220 наименований.

Область исследования и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 18 работах, из них 11 из перечня, рекомендованного ВАК. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены его цели и задачи, перечислены методы исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов диссертационного исследования на всероссийских и международных научных конференциях. Отмечено, что на различных этапах работа поддерживалась грантами РНФ и Министерством науки и образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания, что также свидетельствует об актуальности рассматриваемого диссертационного исследования.

В первой главе приведен обзор основных работ по решению прямых и обратных задач дифракции звука на неоднородных деформируемых твердых телах. Дано описание построенной автором математической модели дифракции гармонических звуковых волн на неоднородных упругих телах, контактирующих с идеальными жидкостями. Приведены уравнения, описывающие волновые поля в идеальной жидкости и упругих телах с неоднородными упругими покрытиями на основе линейной теории упругости, а также граничные и дополнительные условия в задачах дифракции.

Вторая глава посвящена качественному и количественному анализу и решению прямых задач о рассеянии цилиндрических гармонических звуковых волн непрерывно-неоднородными по толщине упругими слоями цилиндрической формы. Исследовано влияние неоднородности материала слоев, а также геометрии падающего поля на их звукоотражающие свойства. Построены решения прямых дифракционных задач, в которых рассматривается падение звуковых волн на однородные упругие цилиндрические тела с радиально-неоднородным изотропным покрытием, а также на неоднородных упругих цилиндрах в случае, когда оси источника и рассеивателя не являются параллельными и не лежат в одной плоскости. На основе этих решений показана возможность изменения звукоотражающих свойств тел за счет неоднородности покрытий и осуществлено математическое моделирование непрерывно-слоистых покрытий.

В третьей главе приведены решения прямых задач о рассеянии гармонических звуковых волн (плоских, цилиндрических и сферических) однородным изотропным упругим цилиндром бесконечной длины с радиально-неоднородным покрытием при наличии плоской подстилающей поверхности. Изучены частотные зависимости коэффициента отражения звука для случаев абсолютно жесткой и акустически мягкой поверхности. Установлено, что неоднородное покрытие позволяет эффективно изменять характеристики рассеяния цилиндрического тела при соответствующем выборе законов неоднородности материала покрытия.

В четвертой главе предложены методы решения прямых и обратных задач дифракции звуковых волн на однородном изотропном упругом бесконечном цилиндре с упругими радиально-неоднородным трансверсально-изотропным покрытием. Получено аналитическое описание волновых полей в жидкости, упругом изотропном цилиндре и трансверсально-изотропном неоднородном слое.

Пятая глава посвящена решению задач дифракции звуковых волн на радиально-неоднородных упругих цилиндрах конечной длины, расположенных в безграничном пространстве, а также вблизи идеальной поверхности.

Для всех перечисленных задач построены численные алгоритмы решения и проведены численные исследования, проиллюстрированные обширным графическим материалом.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на региональных научных мероприятиях, проходивших в Туле и Воронеже, и на всероссийских научных конференциях в Москве.

Соответствие автореферата и публикаций автора требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях в количестве, значительно превышающем требования для кандидатских диссертаций, указанных в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ».

Замечания по работе и ее оформлению:

1. В первой главе приведен достаточно подробный обзор литературы по проблеме дифракции звуковых волн на неоднородных деформируемых твердых телах, включая объекты и методы исследований. Однако отсутствует обзор и классификация функций, используемых для описания свойств неоднородности физико-механических свойств материалов.

2. В пункте 2.1 «Постановка задачи» на странице 26 автор пишет, что «модули упругости материала неоднородного цилиндрического слоя являются дифференцируемыми функциями радиальной координаты, а плотность материала - непрерывной функцией той же координаты». Далее в главах 2-5 при непосредственном проведении численных исследований требовалась конкретизация функций, описывающих неоднородные свойства. При этом ни в одном численном примере выбор того или иного вида неоднородности не был обоснован. Осталось не ясным, какими рассуждениями руководствовался автор при выборе той или иной функции для описания неоднородности параметров.
3. Во всех численных примерах рассматривались алюминиевые цилиндры радиусом 0.8м. Неясно, чем был вызван выбор только этого материала и радиуса.
4. Список литературы состоит из 220 наименований, из них 179 русскоязычных статей и 41 англоязычных источников, из которых всего 32 статьи принадлежат зарубежным исследователям, что, по мнению оппонента, является явно недостаточным. Диссертанту стоило бы уделить большее внимание изучению работ в области дифракции, опубликованных в ведущих международных изданиях в этой области.

Большинство приведенных в списке источников опубликовано до 2000 года и только 5 работ за последние 5 лет, не считая статей руководителя диссертанта и его учеников.

5. Работы [173, 174, 191, 192, 197, 208, 211-213] из списка литературы опубликованы в оригинале в российских журналах на русском языке. Непонятно, зачем диссертант привел их в англоязычной части списка источников.
6. Поскольку диссертация представлена по специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы

программ», то было бы полезно в Приложении привести не только свидетельства о государственной регистрации разработанных автором программ для ЭВМ, но и дать краткое описание разработанных численных методов и комплексов, использованных при численных исследованиях, поскольку в тексте диссертации эти сведения отсутствуют.

7. Есть несколько замечаний по оформлению диссертационной работы: (а) пунктуационные ошибки (стр. 23, 31, 34, 49, 65 и др.); (б) в тексте имеются опечатки, например, в формуле (3.1.8) на стр. 59; (в) формулы, приведенные в первый раз в главе 1 на странице 23, затем неоднократно повторяются в других главах, например, на страницах 107 и 135; (г) радиус цилиндра обозначается то заглавной, то прописной буквами.

Общее заключение: Отмеченные замечания не снижают ценность представленной работы, которая, несомненно, заслуживает положительной оценки.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Ефимова Д.Ю. посвящена анализу рассеяния звуковых волн неоднородными упругими цилиндрическими телами, которые соприкасаются с идеальными жидкостями или погружены в жидкости с такими свойствами. Диссертантом получены новые теоретические результаты, представляющие существенный вклад в развитие теории дифракции звуковых волн и имеющие прикладную направленность. Им внесен значительный личный вклад в решение поставленных задач и проведен их качественный и количественный анализ. Исследования выполнены на высоком научном уровне. Разработаны программы для реализации численных экспериментов.

Обобщая вышесказанное и учитывая новизну, теоретическую и практическую значимость проведенных исследований, считаю, что представленная к защите диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.9 положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор, Ефимов Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор,

Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,

кафедра Высшей математики, заведующий
кафедрой

Шитикова М.В.

14.05.2025

г. Москва, Ярославское шоссе, 26

Телефон: 8(910)3450412

E-mail: ShitikovaMV@mgsu.ru

Заверяю подпись профессора Шитиковой М.В.

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
КАДРОВОГО ДЕЛОПРОИЗ-
ВОДСТВА УРП
А. В. ПИНЕГИН

