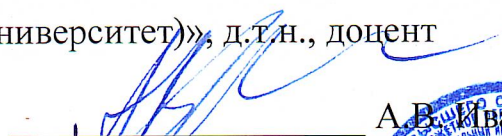


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)», д.т.н., доцент


« 10 » 04 2025 г. А.В. Иванов



**Отзыв ведущей организации
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**

Актуальность темы. Проблема дифракции звуковых волн на упругих телах представляет большой интерес для исследователей. Цилиндрические тела являются важным объектом исследования при моделировании акустических процессов, поскольку конфигурация многих реальных объектов может быть достаточно хорошо аппроксимирована цилиндрической формой. Исследование дифракции звука на неоднородных упругих телах цилиндрической формы имеет как самостоятельную ценность, так и служит необходимой ступенью при создании изделий и элементов конструкций с программируемыми звукоотражающими свойствами.

Содержание работы. Диссертация Ефимова Дмитрия Юрьевича состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы и формулируется основная цель работы. Описываются использованные методы

исследования. Подчеркивается оригинальность и новизна полученных результатов. Отмечается их теоретическая и практическая значимость. Обосновывается достоверность полученных результатов. Указываются сведения об апробации результатов исследования.

В первой главе в разделе 1.1 приведен литературный обзор по проблеме исследования. Рассматриваются работы отечественных и зарубежных авторов, посвященные исследованию дифракции звука на твердых телах цилиндрической формы. Обсуждаются работы, посвященные прямым и обратным задачам дифракции. В разделе 1.2 построены математические модели, описывающие распространение гармонических звуковых волн в идеальной жидкости; в упругих изотропных, анизотропных, однородных и неоднородных средах.

Во второй главе представлены результаты исследования дифракции звуковых волн на неоднородных упругих цилиндрических телах, помещенных в безграничное пространство, заполненное идеальной жидкостью.

В разделе 2.1 рассмотрена задача дифракции цилиндрической звуковой волны произвольной моды на упругом цилиндре с неоднородным упругим покрытием. Полагается, что ось линейного источника расположена параллельно оси цилиндра. Для описания волновых полей во внешней жидкой среде и однородном упругом цилиндре используются разложения по базисным решениям уравнения Гельмгольца с учетом условий излучения и ограниченности. Для определения поля смещений в неоднородном упругом покрытии сформулирована краевая задача для системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Для приближенного решения краевой задачи применен метод сплайн-коллокации с использованием кубических *B*-сплайнов. Исследованы частотные зависимости звукоотражения для различных видов неоднородности. Результаты расчетов выявили существенное влияние неоднородности на звукоотражающие свойства цилиндрического тела.

В разделе 2.2 рассматриваются задачи рассеяния звуковых волн неоднородными упругими цилиндрами в случае, когда источником звука

является линейный источник, ось которого не параллельна оси цилиндра и не лежит с ней в одной плоскости. В 2.2.1 исследуется дифракция симметричной цилиндрической звуковой волны на упругом цилиндре с неоднородным упругим покрытием. В 2.2.2 изучается дифракция цилиндрической волны произвольной моды на неоднородном цилиндрическом слое. Результаты численных расчетов демонстрируют, что угол наклона линейного источника оказывает существенное влияние на поле первичного возмущения, что, в свою очередь, значительно изменяет рассеянное акустическое поле.

Третья глава посвящена задачам рассеяния звуковых волн упругими цилиндрами с неоднородными упругими покрытиями в присутствии плоских подстилающих поверхностей.

В разделе 3.1 исследуется дифракция плоской звуковой волны на упругом цилиндре с неоднородным покрытием, расположенном вблизи идеальной (абсолютно жесткой и акустически мягкой) плоской границы. Для решения этой задачи применяется метод мнимых источников. Задача сводится к задаче рассеяния двух плоских волн на двух идентичных цилиндрах в свободном пространстве. Рассчитаны и проанализированы угловые и частотные характеристики рассеянного акустического поля, демонстрирующие влияние свойств подстилающей поверхности на рассеянное поле.

В разделах 3.2 и 3.3 представлены результаты исследований задач дифракции цилиндрических и сферических звуковых волн на цилиндрическом теле с неоднородным упругим покрытием, расположенном вблизи границы однородного изотропного упругого полупространства. Решение данных задач базируется на применении интегрального уравнения Гельмгольца-Кирхгофа. Для учета эффектов многократного переотражения звуковых волн между цилиндром и границей полупространства используется функция Грина, которая удовлетворяет граничным условиям на границе раздела жидкой и упругой сред. В рамках проведенного исследования были выполнены численные расчеты углового распределения амплитуды рассеянного акустического поля. Проанализировано влияние упругой подстилающей поверхности на

характеристики рассеянного поля. Результаты расчетов показали, что неоднородное покрытие позволяет эффективно изменять характеристики рассеяния путем выбора соответствующих законов неоднородности материала покрытия.

В четвертой главе работы представлены решения задач дифракции звуковых волн на упругих цилиндрах, имеющих неоднородные трансверсально-изотропные упругие покрытия.

В разделе 4.1 решены прямая и обратная задачи дифракции звуковых волн на однородном бесконечном упругом цилиндре с радиально-неоднородным трансверсально-изотропным покрытием. В 4.1.1 решена прямая задача дифракции звуковых волн, излучаемых линейным источником. Результаты расчетов угловых зависимостей звукоотражения показали, что анизотропия и неоднородность материала покрытия цилиндра оказывают существенное влияние на форму диаграмм направленности рассеянного поля. На основе решения прямой задачи в 4.1.2 представлено решение обратной задачи, заключающейся в моделировании неоднородного анизотропного покрытия упругого цилиндра с целью минимизации отражения звука. Определены законы неоднородности материала покрытия (физико-механические параметры), обеспечивающие минимальное рассеяние звука в заданном диапазоне частот при фиксированном угле наблюдения и в определенном угловом секторе при фиксированной частоте. Для определения оптимальных параметров покрытия используется алгоритм имитации отжига, позволяющий выбрать наилучшее решение из множества допустимых вариантов. Результаты численного моделирования демонстрируют, что применение покрытия с оптимально подобранными законами неоднородности позволяет существенно снизить интенсивность рассеянного акустического поля в заданном диапазоне частот и в определенном направлении.

В разделе 4.2 представлено решение задачи рассеяния сферической звуковой волны, излучаемой точечным источником. Были проведены численные расчеты диаграмм направленности рассеянного поля вблизи цилиндрического

тела и частотных характеристик амплитуды рассеяния в дальней зоне. Особое внимание уделено анализу влияния расходимости падающей волны, анизотропии и неоднородности покрытия на формируемую дифракционную картину.

В разделе 4.3 рассматривается задача рассеяния плоской звуковой волны упругим цилиндром с неоднородным трансверсально-изотропным упругим покрытием, расположенным вблизи плоскости (абсолютно жесткой и акустически мягкой). В 4.3.1 получено приближенное решение прямой задачи дифракции. При этом пренебрегается отражение от плоскости волн, рассеянных цилиндром, но учитывается рассеяние цилиндром волны, возникающей при отражении падающей плоской волны от плоскости. В 4.3.2 решена обратная задача об определении законов неоднородности трансверсально-изотропного покрытия упругого цилиндра, обеспечивающих минимальное отражение звука цилиндрическим телом. Проведено сравнение рассчитанных угловых и частотных зависимостей интенсивности звукоотражения для цилиндров с оптимальным неоднородным покрытием и без покрытия.

В пятой главе решены задачи дифракции звуковых волн на упругих цилиндрах конечной длины.

Раздел 5.1 посвящен решению задач дифракции на конечных цилиндрах, расположенных в безграничном пространстве. Полагается, что конечный цилиндр закреплен по торцам в абсолютно жесткие экраны. В 5.1.1 и 5.1.2 рассматриваются задачи дифракции плоской и цилиндрической звуковых волн на цилиндре конечной длины, имеющем неоднородное изотропное покрытие. Для описания волновых полей в окружающей жидкой среде и внутри однородного упругого цилиндра применяются разложения по базисным решениям уравнения Гельмгольца. Результирующее рассеянное поле определяется в виде интеграла Гельмгольца-Кирхгофа. Проведены расчеты угловых и частотных зависимостей амплитуды обратного рассеяния при разных значениях длины цилиндрического рассеивателя. Показано, что неоднородность материала цилиндрического слоя оказывает значительное воздействие на звукоотражающие характеристики

рассеивателя. В 5.1.3 рассмотрена задача дифракции плоской звуковой волны на неоднородном упругом цилиндрическом слое конечной длины.

В разделе 5.2 решена задача о рассеянии плоской звуковой волны неоднородным упругим цилиндром конечной длины, расположенным вблизи плоской поверхности. Исследованы частотные характеристики рассеянного поля для случаев абсолютно жесткой и акустически мягкой поверхностей.

В заключении излагаются основные выводы, полученные в диссертации.

В приложении к диссертационной работе приведены свидетельства о государственной регистрации разработанных автором программных средств для ЭВМ.

Научная новизна работы заключается в следующем: получены решения новых прямых и обратных задач дифракции звуковых волн (плоских, цилиндрических, сферических) на упругих цилиндрических телах с радиально-неоднородными упругими покрытиями. Исследования проведены для цилиндрических тел как бесконечной, так и конечной протяженности, находящихся в свободном пространстве и в присутствии ограничивающих поверхностей.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты имеют теоретическую и практическую ценность. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в гидроакустике для разработки и совершенствования методов звуковой эхолокации различных подводных объектов; в судовой акустике для анализа и оптимизации акустических характеристик судовых конструкций; в дефектоскопии для разработки новых и усовершенствования существующих методов неразрушающего контроля материалов; в медицине при разработке методов ультразвуковой диагностики; в архитектурной акустике для проектирования помещений с требуемыми акустическими характеристиками; в материаловедении для разработки новых промышленных материалов и конструкций с заданными звукоотражающими свойствами.

Рекомендации по использованию диссертационной работы.

Полученные результаты могут найти применение в исследованиях, проводимых в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет), Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институте прикладной механики РАН, институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ механики и прикладной математики им. И.И. Воровича Южного федерального университета, Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Саратовском национальном исследовательском университете им. Н.Г. Чернышевского, Пермском государственном национальном исследовательском университете, Воронежском государственном техническом университете и других организациях, занимающихся динамическими задачами теории упругости.

По диссертации имеются **замечания**.

1. В разделе 2.2 рассеянные акустические поля описываются несобственными интегралами. Однако не указано, как достигалась требуемая точность при вычислении этих интегралов. То же касается несобственных интегралов, используемых в 5.1.3 и 5.2.
2. Не выписано аналитическое решение усеченных бесконечных систем линейных алгебраических уравнений (3.1.14), используемых при получении краевого условия для нахождения решения системы дифференциальных уравнений, что затрудняет оценку результатов.
3. В 2.1, 2.2.2, 4.1, 5.1.2 автор формулирует задачи дифракции цилиндрических акустических волн, излучаемых линейным источником произвольной моды. Однако, все численные результаты приведены только для случаев симметричной цилиндрической волны, когда на поверхности источника возбуждена нулевая мода.
4. В диссертационной работе ничего не сказано о том, являются ли оптимальные решения, полученные при решении обратных задач, единственно возможными.

5. В таблицах 4.1.1 и 4.1.2 приведены характерные значения модулей упругости для трансверсально-изотропных материалов. Если автор использовал значения из справочников, то следовало бы дать соответствующую ссылку. Если автор получал эти значения из каких-либо соображений, то следовало их указать.

6. В разделе 4.1.2 осуществляется моделирование неоднородного анизотропного покрытия с оптимальными звукоотражающими характеристиками. При этом используется алгоритм имитации отжига. На с. 101 автор указывает, что генерирует случайную величину в соответствии с многомерным распределением Коши, но не указано каким способом он это осуществил.

Заключение.

Диссертационная работа Ефимова Дмитрия Юрьевича, посвященная математическому моделированию и численному исследованию взаимодействия звуковых волн в жидкости с неоднородными упругими телами цилиндрической формы, выполнена на хорошем теоретическом уровне. Сделанные замечания не снижают научной ценности диссертации.

Достоинством диссертационной работы является выявление влияния неоднородности материала покрытий цилиндрических тел на рассеяние звука.

Отдельный значительный интерес представляют результаты исследований акустических свойств цилиндрических тел, расположенных вблизи ограничивающих поверхностей, а также исследование особенностей рассеяния звука цилиндрическими телами конечной длины.

Выявлено существенное совместное влияние неоднородности и анизотропии покрытий цилиндрических тел на характеристики звукового рассеяния.

Достоверность полученных автором результатов вытекает из корректной постановки задач и обоснованности применяемых математических методов; обеспечивается проведением расчетов на ЭВМ с контролируемой точностью; подтверждается совпадением результатов с известными результатами для частных случаев.

Диссертация Ефимова Дмитрия Юрьевича является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, которая содержит результаты, имеющие важное значение для теории дифракции звуковых волн.

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах, из них 11 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, Russian Science Citation Index. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает 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.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «МАИ» (протокол № 9 от 07.04.2025 г.).



Г.В. Федотенков, д.ф.-м.н., профессор,
и.о. заведующего кафедрой «Сопротивление
материалов, динамика и прочность машин»
МАИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
+7 499 158-29-77, mai@mai.ru/ www.mai.ru