

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника
Миронова Михаила Арсеньевича о диссертационной работе
Агафонова Александра Александровича «Линейные и нелинейные
эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях»,
представленной на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Теоретические и экспериментальные исследования волн в клиньях имеют давнюю историю и несомненные практические приложения. К настоящему времени возрос интерес к распространению волн в клиньях с усложненной геометрией, приближенной к практическим задачам. Именно таким задачам посвящена настоящая диссертация. В диссертации выполнен большой объем экспериментальных исследований, что во многом восполняет недостаток экспериментальных данных для большого количества современных теоретических работ.

Диссертация состоит из введения, обзорной главы, включающей 7 параграфов и главы, посвященной собственно экспериментальным исследованиям, состоящей из 8 разделов, заключения и библиографии. Разделы экспериментальной части посвящены описанию методик экспериментальных исследований и включают в себя описание экспериментов, их результатов и основные выводы. Общий объем работы составляет 142 страницы, 72 рисунка, 0 таблиц и 128 библиографических ссылок.

В первой, обзорной главе дан полезный, достаточно полный обзор литературы на 33 страницах, в основном, по антисимметричным волнам в клине. Обзор можно рекомендовать для вхождения в тематику клиновых волн. Он дает полное представление об уровне исследований в этой области и о необходимых дальнейших исследованиях. В частности, отмечено малое количество именно экспериментальных работ по нелинейной генерации высших гармоник в анизотропных и изотропных остроугольных клиньях с искусственно созданными дефектами, по влиянию различных дефектов в материале клина, а также по влиянию постоянных или переменных нагрузок на нелинейные упругие свойства клиновых волн. Представляет интерес обзор фундаментальных исследований упругих волн в клиньях с более сложной геометрией. Большинство реальных клиновидных структур, (лопатки вентиляторов, винтов, кромки режущих инструментов (сверла, буры и др.)), не являются прямыми идеальными клиньями. К тому же они всегда содержат те, или иные дефекты (неидеальное заострение, конечная высота, внутренние распределенные дефекты). Это делает необходимым учет влияния этих отклонений от идеальности в теории и, тем более, в эксперименте. В этой главе отмечено также относительно новое

направление науки о клиньях – клинья с нелинейным профилем заострения. Такой профиль обеспечивает, теоретически, достаточно плавное замедление антисимметричной волны и бесконечное время ее распространения до ребра.

Обзор, выполненный в главе 1, позволил автору четко поставить цели и сформулировать задачи для их достижения.

Вторая глава посвящена изложению собственных оригинальных экспериментальных результатов автора. Она разбита на параграфы, каждый из которых содержит исследование определенного эффекта.

Параграф 1 описывает уникальную автоматизированную установку и методики исследования линейных и нелинейных свойств упругих волн в твердотельном клине: импульсный метод и метод лазерной сканирующей виброметрии.

Локализация и дисперсия упругих волн в твердотельном прямом изотропном клине исследованы в параграфе 2. Подтверждена экспоненциальная локализация собственных мод клина и найден показатель экспоненты.

В параграфе 3 исследованы особенности распространения упругих волн в прямом изотропном клине с дефектами. Обнаружена линейная связь амплитуды второй гармоники с амплитудой первой гармоники.

В параграфе 4 исследованы нелинейные эффекты в прямом клине при его одноосном растяжении.

Параграфы 5, 6 посвящен исследованию дисперсии и локализации волн в цилиндрических и спиральных клиньях. Показано, что и при такой геометрии локализация имеет экспоненциальную зависимость. Получены уникальные результаты по дисперсии клиновых волн.

Исследования нелинейности клиновых волн в анизотропном клине (кристалл ниобата лития) представлена в параграфе 7. Получены коэффициенты степенной зависимости амплитуд второй и третьей гармоник клиновых волн от амплитуды волны на основной частоте.

Параграф 8 посвящен исследованию распространения волн по клину, имеющему параболическое заострение. Такая геометрия обеспечивает достаточно плавное замедление распространения изгибающей волны в направлении к ребру клина и соответствующее увеличение ее амплитуды. Сопоставление с теоретическими зависимостями дало хорошее соответствие. Продемонстрирован эффект рефракции при падении волны из однородной части пластины в заостренную.

В разделе **Заключение** кратко сформулированы основные результаты диссертации А.А. Агафонова, приведен список публикаций автора и далее – список цитированной литературы.

Актуальность исследований диссертации не вызывает сомнений. Во-первых, полученные экспериментальные результаты по наблюдению особенностей распространения линейных и нелинейных волн в клиньях позволяют проверять/подтверждать многочисленные теоретические результаты этого направления. Во-вторых, многие конструкции содержат клиновые элементы, подвергающиеся большим нагрузкам в процессе эксплуатации. Ультразвуковой неразрушающий контроль и мониторинг здесь, очевидно, возможен. Данная диссертация демонстрирует эти возможности.

Отмеченные результаты

Результаты работы представляют интерес для теоретиков и вычислителей, исследующих распространение волн в сложных геометриях. Для прямого клина – это надежная регистрация экспоненциального спада поля собственных мод при удалении от ребра клина. Хочется отметить четкую демонстрацию неклассической нелинейности в клиновой волне - амплитуда второй гармоники зависит линейно от амплитуды первой гармоники.

Наглядно и количественно правильно демонстрируются основные свойства акустической черной дыры. Представлены эффектные иллюстрации распространения волн по параболическому клину (рис.2.8.8 и 2.8.9). наглядно продемонстрированы уменьшение длины волн и рефракцию при наклонном возбуждении ЧД. Насколько мне известно, работы А.А. Агафонова являются первыми в России, направленными на систематическое экспериментальное исследование акустических ЧД

В целом, диссертация демонстрирует высокую культуру проведения экспериментов и представления результатов. Практически все экспериментальные результаты уникальны и надежны. Поэтому они ценны для теоретических исследований в области нелинейной акустики твердых тел.

Замечания:

- Стр. 5, автор пишет: *«Клин является единственным типом волновода, в геометрии которого в идеальном случае отсутствует размерный параметр, и, следовательно, отсутствует внутримодовая дисперсия упругих волн.»* - автор забыл про рэлеевскую волну.

- Стр. 60, обзор по параболически заостренным клиньям - Стоит отметить, что в литературе по АЧД (акустические черные дыры) еженедельно появляются работы самой разной направленности (полимеры, сложные формы, комбинации с резонаторами, с электрической нагрузкой и т.п., возможные приложения). Так что список литературы в диссертации по этому направлению

не может считаться полным. Это не упрек автору, а замечание интересующимся читателям.

- Стр. 68, рис. 2.2.3 и текст выше - Непонятно и толком не описана процедура измерения скорости распространения (по приходу фронта, по корреляции, по огибающей)? Это, вообще говоря - нетривиальная задача, особенно при наличии дисперсии.

- Стр. 73, про изменение фазы сигнала - что под этим подразумевается при импульсном возбуждении? (это повторение предыдущего замечания).

- Стр. 75, внизу страницы - *стандартный эхо-импульсный метод* – что это такое: задержка фронта, максимума огибающей, или как? Возможный ответ – на рисунке 2.3.2 – визуальное определение фронта?

- Стр. 105, ниже рис. 2.6.5 «что может быть объяснено сложной геометрией сверла» - но это не объяснение!

- Стр. 119 и выше, экспериментальные кривые амплитуд в АЧД. - Как получены все эти кривые? Это стоячие волны?

Замечания не снижают высокого уровня данной диссертационной работы. Обоснованность, достоверность и новизна полученных автором диссертации результатов не вызывает сомнения. Автореферат диссертации кратко и ясно отражает содержание диссертации. Таким образом, рецензируемая работа отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода.

Диссертационная работа А.А. Агафонова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными и физическими экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчетам и результатам, полученным в работах других авторов. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Считаю, что диссертация «Линейные и нелинейные эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях» соответствует специальности 1.3.7. «Акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова»,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Агафонов Александр Александрович — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Акустика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
начальник теоретического отдела
Акустического института имени академика Н.Н. Андреева

Миронов Михаил Арсеньевич

7
мая 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (499) 723-61-60

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена кандидатская диссертация:

— «Акустика».

Адрес места работы:

, г. Москва, ул. Шверника, д. 4

Акционерное общество «Акустический институт имени
академика Н.Н. Андреева» (АО «АКИН»).

Телефон: +7 (499) 126-74-01; e-mail: info@akin.ru

Подпись Миронова Михаила Арсеньевича УДОСТОВЕРЯЮ:

Заместитель директора АО «АКИН»

п
о
М.П.
и
н
ж
е
н
е