

Б-ка

На правах рукописи

Ивина Наталья Федоровна

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
АКУСТИЧЕСКИХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СООТНОШЕНИЕМ РАЗМЕРОВ**

Специальность: 05.11.06 – акустические приборы и системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Владивосток - 2002

Работа выполнена в Тихоокеанском военно-морском институте им.  
С.О Макарова

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
Касаткин Б.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Коренбаум В.И.  
доктор физико-математических наук, профессор  
Короченцев В.И.  
Заслуженный деятель науки и техники,  
доктор технических наук, профессор  
Пугачев С.И.

Ведущая организация: Кафедра электроакустики и ультразвуковой техники  
Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

Защита состоится 18 июля 2002 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 307.006.01 в Дальневосточном государственном  
техническом рыбохозяйственном университете (Дальрыбвтузе) по адресу:  
690600, Владивосток, ул. Луговая, 52-Б, Дальрыбвтуз

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дальрыбвтуза

Автореферат разослан 27 мая 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, профессор

М.А. Мизеркин

3



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Акустические преобразователи, в частности пьезоэлектрические, являются обязательной и важной частью самых различных акустических приборов и систем, применяемых в гидроакустике, рыбопоисковой технике, ультразвуковой дефектоскопии, медицине и т. д. Основным типом акустических преобразователей являются пьезокерамические преобразователи, в которых активный элемент выполнен из пьезокерамики. Пьезокерамические преобразователи (в дальнейшем пьезопреобразователи) могут иметь разную геометрическую форму и работать на различных модах колебаний. Наиболее часто в пьезопреобразователях используются пьезоактивные элементы в форме круглых пластин, стержней, полых цилиндров, сфер.

Классические задачи расчета и анализа пьезопреобразователей решены на основе их одномерных моделей. Большой вклад в развитие и применение классических методов расчета пьезопреобразователей, которые изложены в известных монографиях и учебниках, внесли отечественные и зарубежные ученые: Н.Н.Андреев, И.П.Голямина, Л.Я.Гутин, Д.Б.Дианов, И.Н.Ермолов, В.Н.Тюлин, А.А.Харкевич, У.Мэзон, Е.Кикучи и многие другие.

Основной недостаток одномерных моделей заключается в том, что они дают удовлетворительные результаты только для основной моды колебаний пьезопреобразователей простейших геометрических форм при определенных ограничениях на соотношение их резонансных и нерезонансных размеров. Для пьезопреобразователей различных конструкций с произвольным соотношением размеров задача становится принципиально трехмерной и описывается не обыкновенными дифференциальными уравнениями, а уравнениями электроупругости в частных производных со сложными граничными условиями. К настоящему времени аналитические решения этих задач в точной постановке не получены. В справочнике «Пьезокерамические преобразователи» (Под ред. С.И.Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.) отмечено: «При использовании ПКЭ (пьезокерамических элементов) в качестве широкополосных преобразова-

телей или составной части многоэлементного преобразователя форма и соотношение размеров ПКЭ обычно не отвечают условиям работы на одномерных линейных или планарных модах колебаний. Такие ПКЭ имеют в сравнительно узком диапазоне частот связанные моды колебаний, анализ которых представляет большие теоретические трудности».

Разработка современных гидроакустических и ультразвуковых систем требует проектирования сложных многофункциональных преобразователей с высокой точностью обеспечения заданных характеристик. Аналитические методы обычно не могут обеспечить проектирование пьезопреобразователей с заданной точностью. Многие типы преобразователей принципиально невозможно рассчитать в рамках одномерных моделей. Поэтому при разработке новых конструкций часто необходима длительная и дорогостоящая экспериментальная доработка для каждого вновь разрабатываемого типа преобразователя.

Таким образом, **актуальность темы** настоящей диссертационной работы заключается в необходимости решения **крупной научной проблемы**, имеющей важное хозяйственное и оборонное значение, - проектирования многофункциональных эффективных акустических преобразователей на основе компьютерных технологий, использующих современные численные методы.

Этими универсальными и перспективными численными методами являются метод конечных элементов и метод граничных элементов, которые использованы в данной работе, а также их комбинация с аналитическими методами. Основным их преимуществом является возможность анализа трехмерных моделей преобразователей с учетом пьезоактивных и пассивных конструктивных элементов без упрощающих допущений с достаточной для практики точностью. Второе преимущество численных методов – возможность создания универсальных программ для анализа и проектирования преобразователей с произвольным соотношением размеров различной геометрической формы.

Проектирование пьезопреобразователей на основе компьютерных технологий позволяет учесть все необходимые эффекты, ускорить анализ возможных вариантов преобразователя, оптимизировать его характеристики. Это позволит

повысить точность проектирования, значительно сократить экспериментальную доработку преобразователя и стоимость этапа разработки, то есть повысить эффективность проектирования.

#### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является развитие методов расчета и повышения эффективности проектирования акустических пьезопреобразователей различного назначения на основе анализа трехмерных компьютерных моделей.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать трехмерные компьютерные модели пьезопреобразователей произвольной осесимметричной формы;
- исследовать собственные колебания осесимметричных пьезопреобразователей с произвольным соотношением размеров;
- решить «сквозные» задачи анализа акустического излучения пьезопреобразователей, совершающих неоднородные колебания, при реальном распределении смещений на излучающей поверхности;
- исследовать возможности оптимизации относительных геометрических размеров пьезопреобразователей;
- применить разработанные методы для проектирования пьезопреобразователей различного назначения.

#### **Научная новизна**

Работа содержит новые научные результаты, наиболее важными из которых, являются следующие:

- Впервые в точной постановке решены задачи о собственных колебаниях круглых конечных пьезопластин из различных составов пьезокерамики: обычной и биморфной (с двумя типами закрепления), в том числе с неоднородным электрическим возбуждением (частичными электродами). Выполнен полный анализ собственных колебаний этих пластин.
- Впервые в точной постановке решены задачи о собственных колебаниях круглых пьезопластин переменного радиуса и переменной толщины из различ-

ных составов пьезокерамики. Выполнен полный анализ собственных колебаний этих пластин.

- Разработан комбинированный численно-аналитический метод решения «сквозной» задачи акустического излучения осесимметричного пьезопреобразователя, излучающего круглым поршнем в жестком экране при реальном распределении смещений на поверхности излучения.
- Впервые в точной постановке решена «сквозная» задача об акустическом излучении водозаполненного пьезоцилиндра с двумя типами поляризации, расположенного возле плоскости с учетом их акустического взаимодействия.
- Получены полные спектры собственных частот пьезоцилиндров с двумя типами поляризации с учетом антисимметричных мод.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена: соответствием численных результатов для собственных колебаний пьезоэлементов с известными предельными аналитическими решениями для тонких пьезопластин (обычной и биморфной), длинных пьезостержней и тонких пьезоколец; соответствием расчетных результатов с экспериментальными измерениями (выполненными как автором, так и заказчиками – предприятиями п/я Г-4956 и п/я В-2645); опубликованием 23 статей по основным результатам диссертации в ведущих рецензируемых и реферируемых научных журналах.

#### **Научная и практическая значимость**

Научная значимость работы состоит в том, что в ней на основе современных численных и численно-аналитических методов разработаны трехмерные модели пьезопреобразователей различного назначения. На основе разработанных автором моделей решены фундаментальные задачи теории колебаний и теории излучения, решения которых не получены аналитическими методами. Исследованы собственные и вынужденные колебания пьезопреобразователей различных типов. Получены теоретические результаты для большого круга прикладных задач, которые, с одной стороны, невозможно получить эмпирически, с другой стороны, эти результаты позволят наиболее эффективно планиро-

вать экспериментальные исследования.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней развиты и использованы новые в конструкторской практике методы анализа и проектирования преобразователей различного назначения с произвольным соотношением размеров. Применение разработанных автором алгоритмов и программ позволяет моделировать и анализировать принципиально новые типы преобразователей с учетом конструктивных особенностей для широкого диапазона частот.

Практическая значимость работы подтверждена также тем, что с применением результатов работы решены конкретные технические проблемы:

- Разработано программное обеспечение, позволяющее эффективно проектировать на персональном компьютере пьезопреобразователи произвольной осесимметричной формы с учетом акустического излучения; комплекс программ использован для расчета и проектирования гидроакустических преобразователей специального назначения (подтверждено актом о внедрении в Дальневосточном государственном университете).
- Определены оптимальные относительные размеры пьезопластин, работающих на квазитолщинных модах, которые различны для пластин из пьезокерамики разных составов. Результаты использованы при разработке высокочастотных гидроакустических антенн (подтверждено актом о внедрении на предприятии п/я Г-4956).
- На основе анализа трехмерных моделей выполнено проектирование специальных гидроакустических (четвертьволновых) преобразователей для телеметрической системы при выполнении опытно-конструкторской работы (подтверждено актом о внедрении на предприятии п/я В-2645).
- Разработанный метод анализа трехмерных колебаний пьезопреобразователей произвольной осесимметричной формы использован для разработки технического решения и оптимизации конструкции антенн акустического профиля силового и компенсированного типа (подтверждено актом о внедрении в Институте проблем морских технологий ДВО РАН).

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены при выполнении хозяйственных работ с предприятиями п/я Г-4956 (г. Санкт-Петербург) и п/я В-2645 (г. Москва), в/ч 87415 (г. Москва), договора о сотрудничестве с Институтом проблем морских технологий ДВО РАН, а также в порядке личной инициативы. Практическая значимость работы подтверждена четырьмя документами о внедрении полученных результатов.

#### **Апробация работы**

По теме диссертации опубликовано 57 научных работ, в том числе: 1 монография, 23 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах («Акустический журнал», «Дефектоскопия», «Прикладная механика», все эти статьи переизданы на английском языке в США в журналах: «Acoustical Physics», «Russian Journal of Nondestructive Testing», «International Applied Mechanics»; тезисы доклада опубликованы в журнале «The Journal of the Acoustical Society of America»), 5 отчетов по хозяйственным научно-исследовательским работам.

Основные результаты работы докладывались на XI Всесоюзной акустической конференции (Москва, 1991), XI Всесоюзной научно-технической конференции «Неразрушающие физические методы и средства контроля» (Москва, 1987), Всесоюзных конференциях «Использование современных физических методов в неразрушающих исследованиях и контроле» (Хабаровск, 1984, 1987), Всесоюзной школе по техническим средствам и методам освоения океана (Геленджик, 1989), Российской гидроакустической конференции «Современное состояние и перспективы развития теории и прикладных вопросов гидроакустики» (Владивосток, 1996), VI Всероссийской акустической конференции «Исследование и освоение Мирового океана» (Владивосток, 1998), XXXX-XXXXIV Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «Фундаментальные и прикладные вопросы физики и математики» (Владивосток, 1997-2001), IV Дальневосточной акустической конференции (Владивосток, 1986), VII Дальневосточной научно-технической конференции по судовой радиоэлектронике (Владивосток, 1994).

Отдельные результаты работы обсуждались с ведущими специалистами: Института проблем прочности АН УССР (г. Киев, 1985), НПО «Уран» (г. Санкт-Петербург, 1986, 1991), Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (1987), НИИ Интроскопии (г. Москва, 1987), ОКБ Московского энергетического института (1988, 1991), Института механики АН УССР (г. Киев, 1989), ЦНИИ Морфизприбор (г. Санкт-Петербург, 1989).

Полностью диссертация докладывалась и обсуждалась на семинарах в Тихоокеанском военно-морском институте им. С.О.Макарова и Дальневосточном государственном техническом рыбохозяйственном университете.

#### **Личный вклад автора**

Все основные научные положения, выносимые на защиту и отвечающие требованиям новизны, получены автором лично. Автором выполнены постановка задач исследования, предложены методы их решения, разработаны алгоритмы и программы, выполнен анализ полученных результатов. 15 работ (в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах) выполнены без соавторов. В работах, выполненных в соавторстве, автор принимал равноценное участие в постановке задач, их решении и анализе результатов.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Трехмерные математические модели для анализа собственных колебаний и акустического излучения пьезопреобразователей, рассмотренных в диссертации, на основе современных численных и численно-аналитических методов; алгоритмы и программы этих методов. Пьезопреобразователи могут представлять собой как отдельные пьезоэлементы, так и сложные конструкции, состоящие из пьезоактивных и пассивных элементов.

2. Результаты анализа собственных колебаний круглых пьезопластин из различных составов пьезокерамики, в том числе с частичными электродами, переменного радиуса, переменной толщины, биморфной. Для пьезопластин указанных типов определены частоты резонанса, антирезонанса, формы колебаний, динамический коэффициент электромеханической связи (ДКС) и их зави-

симости от геометрических размеров. Для применения в акустических приборах определены оптимальные геометрические размеры пьезопластин, обеспечивающие максимальный ДКС.

3. Классификация всех составов пьезокерамики на два типа на основе анализа особенностей спектров собственных частот и форм колебаний круглых пьезопластин. К пьезокерамике первого типа относятся, например, составы ЦТС-19, ЦТБС-3, ЦТСНВ-1. Для этой пьезокерамики максимальный ДКС толщинных колебаний можно оценить через статические коэффициенты связи продольных ( $k_{33}$ ) и толщинных ( $k_t$ ) колебаний следующим образом:  $k \approx 0,5k_{33}$ ,  $k \approx 0,7k_t$ . К пьезокерамике второго типа относятся составы НБС-1, ТБКС, ТБК. Соответствующие оценки для пьезокерамики второго типа:  $k \approx 0,7k_{33}$ ,  $k \approx 0,8k_t$ .

4. Техническое решение проблемы улучшения характеристик квазитолщинных колебаний круглых пьезопластин применением неоднородного электрического возбуждения (частичных осесимметричных электродов). Показано, что для пьезопластин из керамики первого типа при помощи частичных электродов можно улучшить распределение компонент смещения и повысить ДКС квазитолщинных мод до величины  $k \approx 0,8k_t$  (то есть до величины ДКС пьезопластин из керамики второго типа); определены оптимальные относительные размеры пьезопластин и электродов. Для пластин из пьезокерамики второго типа не удается увеличить ДКС при помощи частичных электродов.

5. Техническое решение проблемы улучшения характеристик квазитолщинных колебаний круглых пьезопластин изменением формы пластины. Показано, что применение пьезопластин нетрадиционной формы (переменного радиуса и переменной толщины) позволяет значительно уменьшить радиальную компоненту смещения, получить почти монотонное распределение нормальной компоненты смещения и повысить ДКС; определены оптимальные относительные размеры пластин. Отмечено, что наиболее перспективными для применения в акустических приборах являются выпуклые пьезопластины переменного радиуса из пьезокерамики первого типа.

6. Результаты анализа основных характеристик акустического излучения круглых пьезопластин в плоском жестком экране, работающих на квазитолщинных модах, в том числе пластин с частичными электродами, переменного радиуса и переменной толщины. Показано, что при оптимальных размерах пьезопластин, определенных из условия максимума ДКС, достигается и максимальная чувствительность в режиме излучения. Отмечено, что для круглых пьезопластин нетрадиционной формы при оптимальных размерах достигается большая чувствительность в режиме излучения и меньший уровень боковых лепестков диаграммы направленности.

7. Анализ и проектирование четвертьволновых пьезопреобразователей с использованием трехмерных моделей на основе современных численных методов. Расчет основан на предварительном анализе осесимметричных собственных колебаний отдельных четвертьволновых блоков (излучающей накладки и пьезоблока) для обеспечения заданной частоты и условий жесткого закрепления; дальнейшем расчете параметров преобразователя с учетом акустической нагрузки. Определение возможных причин погрешности расчета преобразователя в одномерном приближении.

8. Расчет полных спектров собственных частот пьезоцилиндров с учетом антисимметричных мод. Исследование условий, ограничивающих излучаемую акустическую мощность водозаполненного пьезоцилиндра, расположенного вблизи жесткой плоскости. Показано, что паразитная антисимметричная мода, которая может попасть в рабочий диапазон частот, значительно искажает распределения давления и нормальной колебательной скорости на поверхности цилиндра, что ограничивает излучаемую акустическую мощность.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем диссертации 356 стр., включая 269 стр. текста, 87 стр. иллюстраций (108 рис.). Список цитируемой литературы содержит 388 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика известных работ по рассматриваемой тематике, обоснована актуальность темы диссертации. Изложены основные положения диссертационной работы, которые отвечают требованиям новизны и выносятся на защиту; сформулированы научная и практическая значимость работы. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

**Глава 1. Основные соотношения метода конечных элементов для анализа акустических пьезопреобразователей.**

В первой главе изложены основные соотношения метода конечных элементов для численного анализа пьезопреобразователей произвольных размеров. Рассмотрены основные алгоритмы метода конечных элементов, которые использованы при решении различных задач. Отмечено, что в методе конечных элементов любая реальная конструкция описывается системой линейных алгебраических уравнений большой размерности относительно неизвестных узловых значений искомых величин. При изучении собственных колебаний пьезопреобразователей решается обобщенная матричная задача на собственные значения.

В методе конечных элементов скалярные (например, электрический потенциал  $\varphi$ ) и векторные величины (например, вектор смещений  $\{u\}$ ) определяются через свои узловые значения с помощью интерполяционных матриц. Интерполяционные матрицы формируются из соответствующих интерполяционных функций (функций формы) конечного элемента. Количество функций формы равно количеству узлов конечного элемента, а их вид зависит от типа конечного элемента и порядка аппроксимации.

$$\varphi = \{N_\varphi\}^T \{\varphi_i\}, \quad \{u\} = [N_u] \{u_i\}, \quad (1)$$

$\{N_\varphi\}^T$  – интерполяционная матрица-строка, символ  $T$  означает транспонирование;  $[N_u]$  – интерполяционная матрица;  $\{\varphi_i\}$ ,  $\{u_i\}$  – векторы узловых значений. Если определены смещения в пределах конечного элемента, то можно вычислить и деформации  $\{s\} = [B_S] \{u_i\}$ ,  $[B_S]$  – интерполяционная матрица для дефор-

маций,  $[B_S] = [L_S][N_u]$ ,  $[L_S]$  – матричный дифференциальный оператор, зависящий от вида деформации и определяемый по известным соотношениям линейной теории упругости. Систему уравнений, описывающих состояние пьезоэлектрической среды, возьмем в виде

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [c] \{s\} - [e] \{E\}, \\ \{D\} &= [e]^T \{s\} + [\varepsilon] \{E\}, \end{aligned} \quad (2)$$

$\{\sigma\}$  – вектор упругих напряжений;  $[c]$  – матрица упругих постоянных, определенных при постоянном электрическом поле;  $[e]$  – матрица пьезоэлектрических постоянных;  $[\varepsilon]$  – матрица диэлектрических постоянных, определенных при постоянной деформации;  $\{E\}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\{D\}$  – вектор электрической индукции.

Пусть конечное пьезоэлектрическое тело объемом  $V$  ограничено поверхностью  $S$ , на части  $S_1$  которой могут быть приложены поверхностные силы, остальная часть поверхности свободна от механических напряжений; на части  $S_2$  нанесены тонкие электроды, представляющие эквипотенциальные поверхности. Силы, распределенные на поверхности  $S_1$ , нужно учитывать при дальнейшем анализе пьезопреобразователя с учетом акустической нагрузки. На электродах задается поверхностная плотность электрического заряда  $\gamma$ , которая определяет пьезоток. Тогда лагранжиан (функцию Лагранжа) при гармонической временной зависимости ( $\exp(i\omega t)$ ) можно записать в виде

$$L = 0,5 \iiint_V \left( \{s\}^T \{\sigma\} - \{E\}^T \{D\} - \omega^2 \rho \{u\}^T \{u\} \right) dV - \iint_{S_1} \{u\}^T \{f\} dS - \iint_{S_2} \gamma \varphi dS,$$

$\omega$  – круговая частота;  $\rho$  – плотность пьезокерамики;  $\{f\}$  – вектор плотности поверхностных сил. Введя конечно-элементную аппроксимацию лагранжиана из условия его стационарности с учетом выражений (1) и (2), получим глобальную систему линейных алгебраических уравнений метода конечных элементов, описывающую пьезокерамическое тело произвольных размеров

$$([K_{uu}] - \omega^2[M])\{u_i\} + [K_{u\varphi}]\{\varphi_i\} = \{F\},$$

$$[K_{u\varphi}]^T\{u_i\} + [K_{\varphi\varphi}]\{\varphi_i\} = \{Q\}, \quad (3)$$

$\{F\}$  – вектор внешних узловых сил;  $\{Q\}$  – вектор внешних электрических зарядов. Глобальные матрицы массы  $[M]$ , жесткости  $[K_{uu}]$ , пьезоэлектрической «жесткости»  $[K_{u\varphi}]$ , диэлектрической «жесткости»  $[K_{\varphi\varphi}]$  определяются структурным суммированием соответствующих элементных матриц, которые выражаются через тройные интегралы по объему конечного элемента:

$$[m] = \rho \iiint_{V_e} [N_u]^T [N_u] dV, \quad [k_{uu}] = \iiint_{V_e} [B_S]^T [c] [B_S] dV,$$

$$[k_{u\varphi}] = \iiint_{V_e} [B_S]^T [e] [B_E] dV, \quad [k_{\varphi\varphi}] = -\iiint_{V_e} [B_E]^T [\varepsilon] [B_E] dV.$$

После введения электрических граничных условий на электродах и исключения электрических потенциалов узлов, находящихся вне электродов (выполнения конденсации системы уравнений), порядок глобальной системы (3) понижается, и в ней останутся только две электрические переменные: напряжение  $V$  и ток  $I$ . В безразмерном виде система (3) примет следующий вид

$$([H_{uu}] - (k_1 a)^2 c_{44} [M])\{u_i\} + \{H_{uv}\}V = \{F\},$$

$$\{H_{uv}\}^T\{u_i\} + H_{vv}V = -iI / \omega, \quad (4)$$

$k_1 a$  – безразмерная частота;  $k_1$  – волновое число поперечной волны в пьезокерамике;  $a$  – геометрический размер, на который производится нормировка;  $c_{44}$  – элемент безразмерной матрицы упругих постоянных пьезокерамики;  $i$  – мнимая единица;  $[H_{uu}]$ ,  $\{H_{uv}\}$ ,  $H_{vv}$  – глобальные матрицы, полученные после конденсации.

Собственные колебания пьезопреобразователя исследуются в двух режимах: резонанса (короткого замыкания) и антирезонанса (холостого хода). Для анализа режима резонанса из системы (4) при отсутствии внешних сил нужно выразить электрическую проводимость пьезопреобразователя

$$Y = I/V = i\omega(H_{vv} - \{H_{uv}\}^T [A]^{-1} \{H_{uv}\}), \text{ где } [A] = [H_{uu}] - (k_1 a)^2 c_{44} [M].$$

Если не учитывать потери, то электрическая проводимость стремится к бесконечности при условии, что матрица  $[A]$  становится сингулярной, то есть ее определитель стремится к нулю; в этом случае частота приближается к резонансной частоте. Таким образом, частоты резонанса и распределения смещений на этих частотах (позволяющие судить о формах колебаний) находятся из решения обобщенной матричной задачи на собственные значения

$$([H_{uu}] - (k_1 a)^2 c_{44} [M])\{u_i\} = 0.$$

Для анализа режима антирезонанса из системы (4) нужно выразить электрический импеданс пьезопреобразователя. Из условия, что он стремится к бесконечности, получим матричную задачу для определения частот антирезонанса

$$([H_{uu}] - \{H_{uv}\} \{H_{uv}\}^T / H_{vv} - (k_1 a)^2 c_{44} [M])\{u_i\} = 0.$$

Зная частоты резонанса и антирезонанса, можно оценить рабочую полосу частот пьезопреобразователя. Рабочая полоса частот и эффективность преобразования энергии в пьезопреобразователе пропорциональны коэффициенту электромеханической (пьезоэлектрической) связи. Для каждого типа пьезоэлемента, допускающего приближенное одномерное представление, известны соответствующие статические коэффициенты электромеханической связи. В динамическом случае коэффициент электромеханической связи зависит от распределения механических и электрических величин по объему пьезопреобразователя. Следовательно, он является функцией его геометрических размеров и имеет обычно меньшую величину, чем коэффициент связи для статического случая. Выбором оптимальных геометрических размеров можно добиться максимального значения динамического коэффициента связи (ДКС) для конкретного типа пьезопреобразователя, работающего на определенной моде колебаний. В методе конечных элементов ДКС вычисляется по выражению

$$k = k_1 / \sqrt{1 + k_1^2}; \quad k_1^2 = (\{H_{uv}\}^T \{u_i\})^2 H_{vv}^{-1} / ((k_1 a)^2 c_{44} \{u_i\}^T [M] \{u_i\}).$$



На основе представленных соотношений метода конечных элементов разработаны трехмерные компьютерные модели для анализа собственных колебаний осесимметричных пьезопреобразователей различной формы.

## Глава 2. Анализ собственных колебаний круглых пьезопластин и пьезостержней произвольных размеров.

Во второй главе исследованы собственные колебания круглых пьезопластин (обычных и биморфных со сплошными и частичными электродами) и пьезостержней с произвольным соотношением размеров. Методом конечных элементов решены задачи о собственных колебаниях преобразователей этого типа.

Сначала проанализированы колебания круглой пластины (стержня) в изотропном и анизотропном приближениях. Численные результаты сравнены с известными предельными аналитическими решениями для тонких пластин и длинных стержней, а также с модами Ламе. Получено хорошее соответствие численных и известных частных аналитических решений.

Выполнен анализ собственных колебаний круглых пьезопластин (пьезостержней) произвольных размеров. На рис. 1 представлен спектр собственных частот симметричных по толщине (высоте) колебаний круглого пьезопреобразователя из керамики ЦТБС-3. В цилиндрической системе координат пьезопреобразователь ограничен координатными поверхностями  $r=a$ ,  $z=\pm l$ . Сначала рассмотрен случай сплошных электродов, когда они полностью покрывают плоскости  $z=\pm l$ . Спектр собственных частот представлен в координатах  $x=k/a$ ,  $y=k/l$ . На каждый луч, выходящий из начала координат и соответствующий определенному геометрическому размеру преобразователя  $l/a$ , нанесены одновременно частоты резонанса (сплошные линии) и частоты антирезонанса (штриховые линии при условии их несовпадения со сплошными линиями). По разности частот антирезонанса и резонанса можно приблизительно судить об эффективности преобразования энергии пьезопреобразователем. Для пьезоактивных участков, то есть участков, эффективно возбуждаемых приложенным электрическим полем, эта разность большая и хорошо видна на рис. 1. Точную количественную

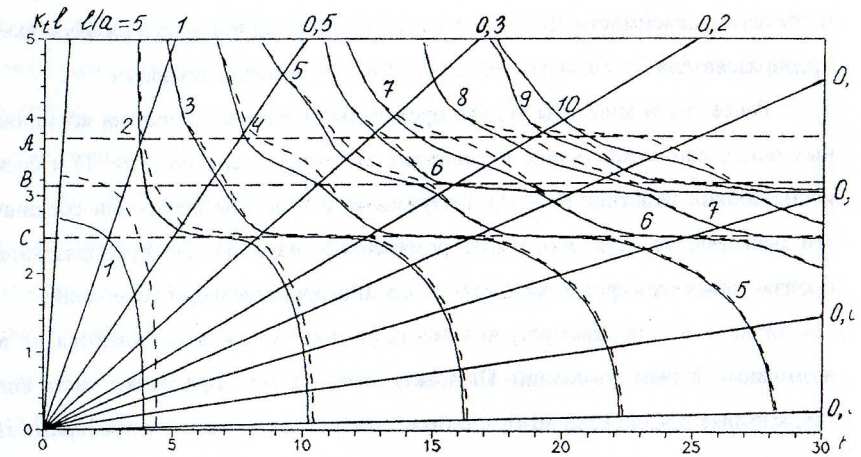


Рис. 1. Спектр собственных частот круглой пьезопластины (пьезостержня) из пьезокерамики ЦТБС-3

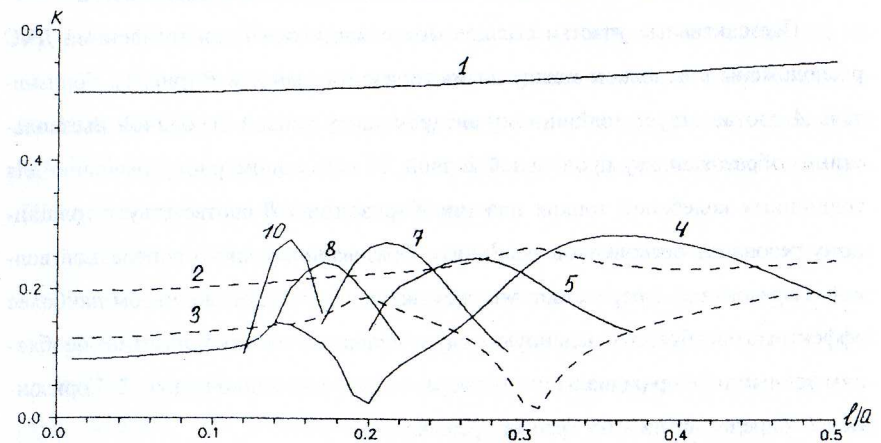


Рис. 2. Зависимости динамического коэффициента электромеханической связи круглой пьезопластины из пьезокерамики ЦТБС-3 от толщины

характеристику эффективности преобразования энергии дает ДКС. На рис. 2 приведены зависимости ДКС различных мод от относительного размера пьезопреобразователя  $l/a$ . Номера мод на рис. 1 и 2 обозначены цифрами.

Ранее были известны только предельные решения (точки на координатных осях), соответствующие бесконечно длинному стержню ( $l/a \gg 1$ ) и бесконечно тонкой пластине ( $l/a \ll 1$ ). Полученные результаты позволили соединить эти решения, то есть определить резонансные частоты для преобразователя произвольных размеров и рассмотреть всё многообразие форм колебаний.

Рис. 1 и 2 показывают, что электрическим полем возбуждаются не все возможные формы колебаний. Пьезоактивные участки определяют части спектра, которые эффективно возбуждаются электрическим полем в преобразователе со сплошными электродами. Рассмотрены все типы колебаний: радиальные, объемные, толщинные, продольные и колебания типа краевого резонанса длинных стержней и тонких пластин. Из всех мод, имеющих высокий ДКС, наибольший практический интерес представляют моды с синфазным распределением осевой компоненты смещения на плоской излучающей поверхности.

Пьезоактивные участки высших мод с максимальными значениями ДКС расположены в основном между двумя горизонталями  $A$  и  $B$  (рис. 1). Горизонталь  $A$  соответствует толщинному антирезонансу тонкой свободной пьезопластины, образованному продольной волной, то есть одномерному решению для толщинных колебаний тонких пластин. Горизонталь  $B$  соответствует толщинному резонансу бесконечной пластины, образованному чисто поперечной волной. Горизонталь  $A$  пересекает все пьезоактивные участки, но, чтобы наиболее эффективно возбуждать заданную моду в диапазоне толстых пластин, необходим точный подбор радиального размера, что хорошо видно на рис. 2. Горизонталь  $C$  определяет частоту краевого резонанса.

Показано, что только для основной моды пьезостержня при  $l/a > 2$  распределение осевой компоненты близко к постоянному (поршневому). Характерно, что для толщинных колебаний конечных пьезопластин с максимальным значе-

нием ДКС распределение осевой компоненты смещения не является поршневым, а имеет осциллирующий характер. По этой причине такие колебания называются квазитолщинными, они формируются четвертой, седьмой, десятой, тринадцатой и последующими модами при определенных относительных толщинах пьезопластины.

На рис. 3 приведены распределения осевой и радиальной компонент смещения четырех низших квазитолщинных мод на плоской поверхности пьезопластины. По оси абсцисс отложены номера равноотстоящих узловых точек, точка 1 находится на оси пластины, последняя точка (25, 33 или 49) - на краю пластины. Для каждого рисунка указаны: безразмерная толщина, номер моды, величина ДКС. Максимум ДКС каждой квазитолщинной моды достигается при определенной - оптимальной толщине  $l/a$ . Максимальное значение ДКС квазитолщинных колебаний  $k_{max} \approx 0,28$  меньше статического коэффициента связи толщинных колебаний  $k_f = 0,41$ , рассчитанного по одномерной теории.

Результаты расчетов проверены экспериментально по измерению частот резонанса и антирезонанса пьезопластин различных размеров из разных составов пьезокерамики. Отметим, что рассчитанные распределения смещений находятся в хорошем соответствии с экспериментально измеренными распределениями, приведенными в известной монографии «Физическая акустика» (Под ред. У.Мэзона. М.: Мир, 1966. Т.1, ч.А. 592 с.), что также подтверждает правильность полученных численных результатов.

На рис. 4, 5 приведены результаты для пьезопластины из керамики НБС-1. Для пластины из этой пьезокерамики горизонтали  $A$  и  $B$  практически совпадают, и пьезоактивные участки высших мод почти горизонтальны. В этом случае резонансные частоты слабо зависят от размера пластины даже для толстых пластин, что отмечалось для изотропной пластины в монографии В.Т.Гринченко и В.В.Мелешко «Гармонические колебания и волны в упругих телах» (Киев: Наук. думка, 1981. 284 с.) как аномальное поведение спектра собственных частот. Рис. 5 в сравнении с рис. 2 показывает, что максимальные

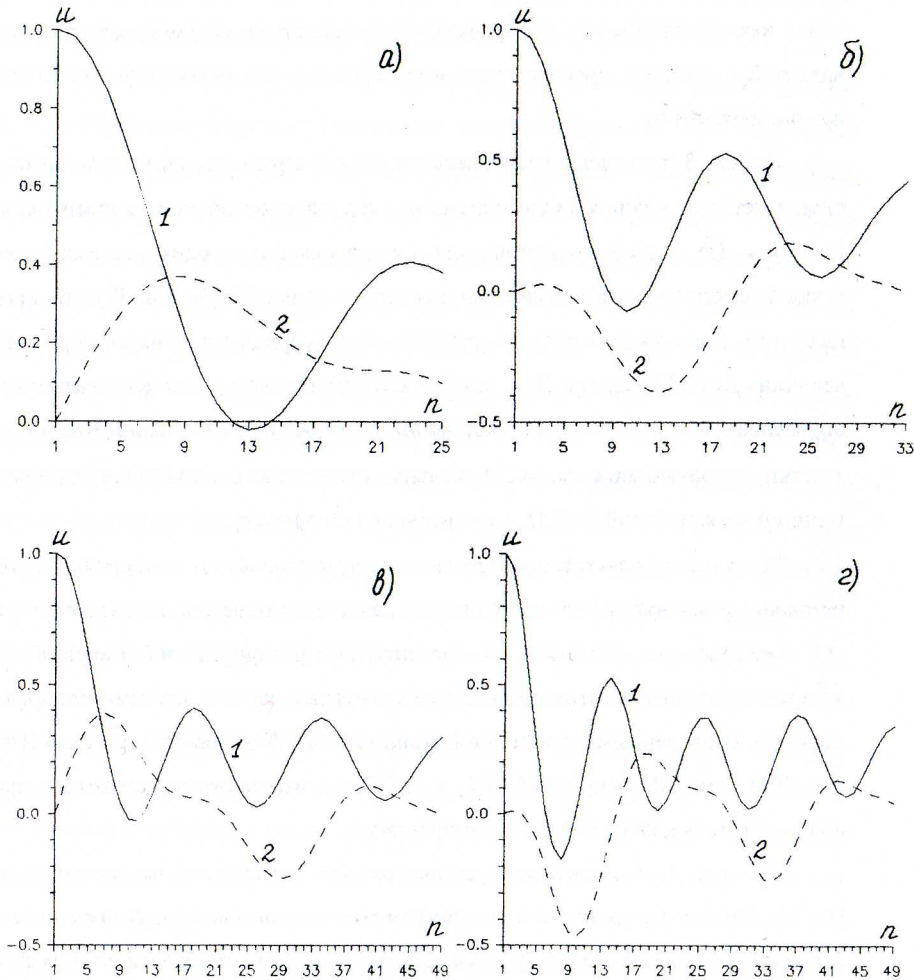


Рис. 3. Распределения компонент смещения на плоской поверхности пьезопластины из керамики ЦТБС-3 для квазитолщинных мод: 1 – осевая компонента, 2 – радиальная компонента: а –  $l/a=0,35$ ,  $n=4$ ,  $k=0,28$ ; б –  $l/a=0,22$ ,  $n=7$ ,  $k=0,27$ ; в –  $l/a=0,15$ ,  $n=10$ ,  $k=0,28$ . г –  $l/a=0,11$ ,  $n=13$ ,  $k=0,28$

значения ДКС высших мод пьезопластины из керамики НБС-1 больше, чем у пластины из пьезокерамики ЦТБС-3 (и близки к ДКС основной моды и даже превосходят его). Максимальный ДКС квазитолщинных колебаний достигается, как и прежде, четвертой, седьмой, десятой и последующими модами. Они характеризуются синфазным распределением осевой компоненты смещения, малой радиальной компонентой, увеличением количества осцилляций осевой компоненты смещения при увеличении номера моды. Максимальный ДКС этих мод равен 0,38; справочные данные по одномерной теории –  $k_r=0,45$ .

Для пьезопластины из керамики ЦТБС-3 максимальное значение ДКС квазитолщинных колебаний составляет  $k_{max} \approx 0,7k_i$ ; для пластины из пьезокерамики НБС-1 –  $k_{max} = 0,84k_r \approx 0,8k_r$ . Большему значению ДКС квазитолщинных колебаний пьезопластины из керамики НБС-1 соответствует и более равномерное распределение нормальной компоненты смещения на ее поверхности. В этом случае у нормальной компоненты смещения отсутствует противофазный участок в ее первом минимуме и ее среднее значение больше.

По типу спектра собственных частот, распределению нормальной компоненты смещения и величине ДКС все составы пьезокерамики можно разделить на два типа. К первому типу относятся, например, составы ЦТБС-3, ЦТС-19, ЦТСНВ-1, а ко второму – НБС-1, ТБКС, ТБК-3. Предложенная классификация всех составов пьезокерамики на два типа оказывается полезной и при дальнейшем анализе круглых пьезопластин с частичными электродами и пластин нетрадиционной формы.

Исследовано влияние неоднородного электрического возбуждения (частичного электродного покрытия) круглой пьезопластины на основные характеристики ее собственных колебаний. Рассмотрено два основных варианта осесимметричных частичных электродов. Первый вариант – кольцевые периферийные электроды, в этом случае центральная часть пластины не покрыта электродами. Второй вариант – частичные круговые электроды. Выполнен полный анализ собственных колебаний указанных вариантов пьезопластин с частичны-

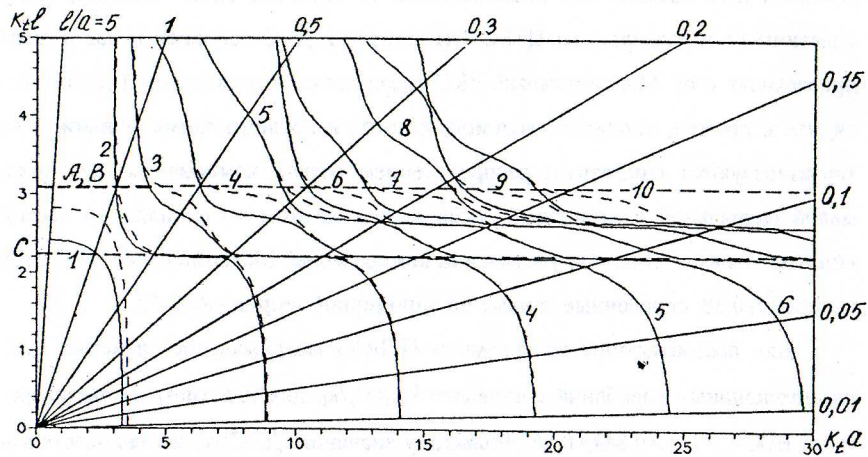


Рис. 4. Спектр собственных частот круглой пьезопластины (пьезостержня) из пьезокерамики НБС-1

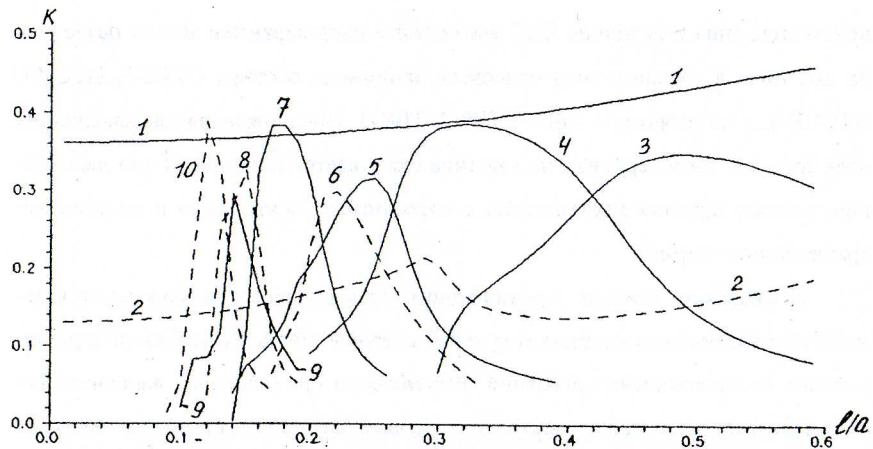


Рис. 5. Зависимости динамического коэффициента электромеханической связи круглой пьезопластины из пьезокерамики НБС-1 от толщины

ми электродами из керамики двух типов. Показано, что для пьезопластин из керамики первого типа при помощи частичных электродов оптимальных размеров можно повысить ДКС квазитолщинных мод до величины  $k \approx 0,8k_t$  (то есть до величины ДКС пьезопластин из керамики второго типа). Увеличение ДКС сопровождается и улучшением равномерности распределения нормальной компоненты смещения на плоской поверхности пластины. Для пластин из пьезокерамики второго типа ДКС при помощи частичных электродов увеличить не удастся. Таким образом, сплошные электроды являются оптимальными для квазитолщинных мод пьезопластин, изготовленных из керамики второго типа.

Выполнен полный анализ собственных колебаний круглых биморфных пьезопластин произвольных размеров, работающих на изгибной моде. Рассмотрены два варианта закрепления этих пьезопластин: свободно опертая и жестко закрепленная (защемленная) пластины. Для предельных случаев бесконечно тонких пластин рассчитанные собственные частоты и распределения нормальной компоненты смещения находятся в хорошем соответствии с известными одномерными решениями. Определены пределы применимости одномерных моделей этих пластин. Исследованы собственные колебания биморфных пьезопластин с частичными электродами. Отмечено, что для первой моды свободно опертой пластины сплошные электроды являются практически оптимальными; при помощи частичных электродов ДКС увеличивается незначительно. В случае жестко закрепленной биморфной пьезопластины частичные электроды позволяют значительно повысить эффективность преобразования энергии и увеличить ДКС в десятки раз (пластина со сплошными электродами работает неэффективно); определены оптимальные размеры электродов.

### Глава 3. Анализ собственных колебаний круглых пьезопластин переменного радиуса и переменной толщины.

Как известно из экспериментальных исследований и теоретически показано в главе 2 распределение нормальной компоненты смещения на плоской поверхности обычной круглой пьезопластины для толщинных колебаний не яв-

ляется постоянным, как следует из одномерной теории. Реальное распределение нормальной компоненты смещения толщинных колебаний на поверхности пьезопластины имеет осциллирующий характер, что обусловлено наличием цилиндрической поверхности, ограничивающей пьезопластину в радиальном направлении. Изготовление пластины в форме, отличающейся от традиционной, приведет к изменению ее собственных колебаний: резонансных частот и форм колебаний. Варьируя форму боковой поверхности пьезопластины, можно попытаться улучшить характеристики толщинных колебаний: уменьшить амплитуду осцилляций нормальной компоненты смещения на поверхности пластины, повысить ДКС и уменьшить радиальную компоненту смещения. Как показано в главе 2, непоршневой характер толщинных колебаний конечной пьезопластины приводит к тому, что ДКС этих колебаний не достигает статического коэффициента связи толщинных колебаний  $k_t$ , определенного по одномерной теории.

Два технологически простых, симметричных относительно плоскости  $z=0$  варианта пьезопластин переменного радиуса (с линейно изменяющимся радиусом) изображены на рис. 6а, б. Для краткости изложения определим пластину, изображенную на рис. 6а, как выпуклую пластину переменного радиуса в отличие от вогнутой пластины - рис. 6б. Для решения этих же проблем исследованы собственные колебания пьезопластин переменной толщины с линейно изменяющейся толщиной: двояковыпуклой, двояковогнутой, конически-выпуклой и конически-вогнутой (рис. 6в - е). Колебания пьезопластин переменного радиуса и переменной толщины в точной постановке не исследовались из-за невозможности их анализа существующими аналитическими методами. В монографии «Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля» (Под. ред. И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.) отмечено, что: «... разработка общей теории работы осесимметричных преобразователей переменной толщины произвольной формы представляет большие трудности, ...».

При анализе собственных колебаний пьезопластин переменного радиуса и переменной толщины выполняются граничные условия, аналогичные гранич-

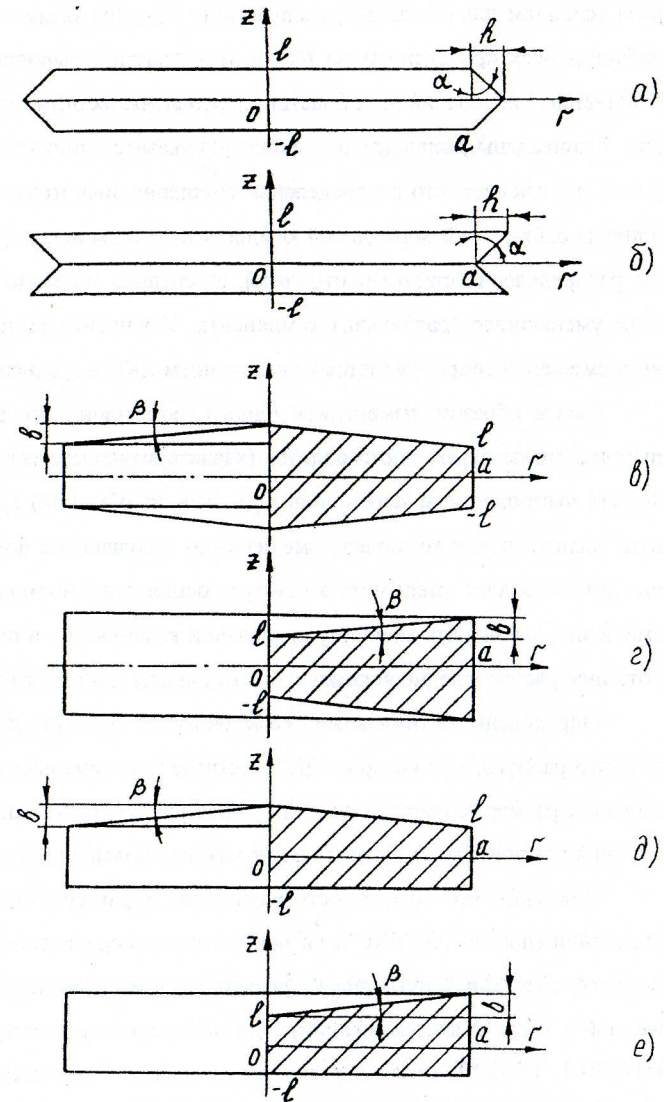


Рис. 6. Пьезопластины нетрадиционной формы: а, б - переменного радиуса, а - выпуклая; б - вогнутая; в - е - переменной толщины, в - двояковыпуклая; г - двояковогнутой; д - конически - выпуклая; е - конически - вогнутая.

ным условиям для обычной пьезопластины. Решены задачи о собственных колебаниях всех приведенных на рис. 6 пьезопластин; выполнен полный анализ собственных колебаний этих пластин, определены их оптимальные размеры. На рис. 7 приведены распределения смещения квазитолщинных мод. Из сравнения рис. 3 и 7 следует, что распределения смещения значительно изменились: амплитуда осцилляций нормальной компоненты уменьшилась (для четвертой моды распределение стало монотонным), ее среднее значение увеличилось; при этом уменьшилась радиальная компонента. Улучшение распределения компонент смещения сопровождается и увеличением ДКС в среднем на 20 %.

Таким образом, изменением одного геометрического размера выпуклой пьезопластины переменного радиуса (характеризующего величину отклонения формы пьезопластины переменного радиуса от обычной) можно корректировать распределение компонент смещения на излучающей поверхности пластины. Это позволяет уменьшить амплитуду осцилляций нормальной компоненты смещения, уменьшить величину радиальной компоненты и получить почти монотонное распределение нормальной компоненты для квазитолщинных мод.

Определены оптимальные геометрические размеры пьезопластин переменного радиуса, при которых ДКС достигает максимального значения. Оптимальным размерам соответствует и лучшая равномерность распределения нормальной компоненты смещения на излучающей поверхности пластины.

Показано, что возможность улучшения характеристик квазитолщинных колебаний (повышение ДКС и равномерности распределения нормальной компоненты смещения) значительно зависит от типа пьезокерамики (по предложенной в главе 2 классификации). Для пьезокерамики первого типа (ЦТБС-3, ЦТСНВ-1, ЦТС-19) целесообразно использование выпуклых пьезопластин. В этом случае ДКС квазитолщинных колебаний удастся увеличить до значения  $k \approx 0,8k_1$ , то есть по этому показателю пьезокерамика первого типа приближается к пьезокерамике второго типа. Применение вогнутых пьезопластин, изготовленных из керамики первого типа, дает незначительное увеличение ДКС. Для

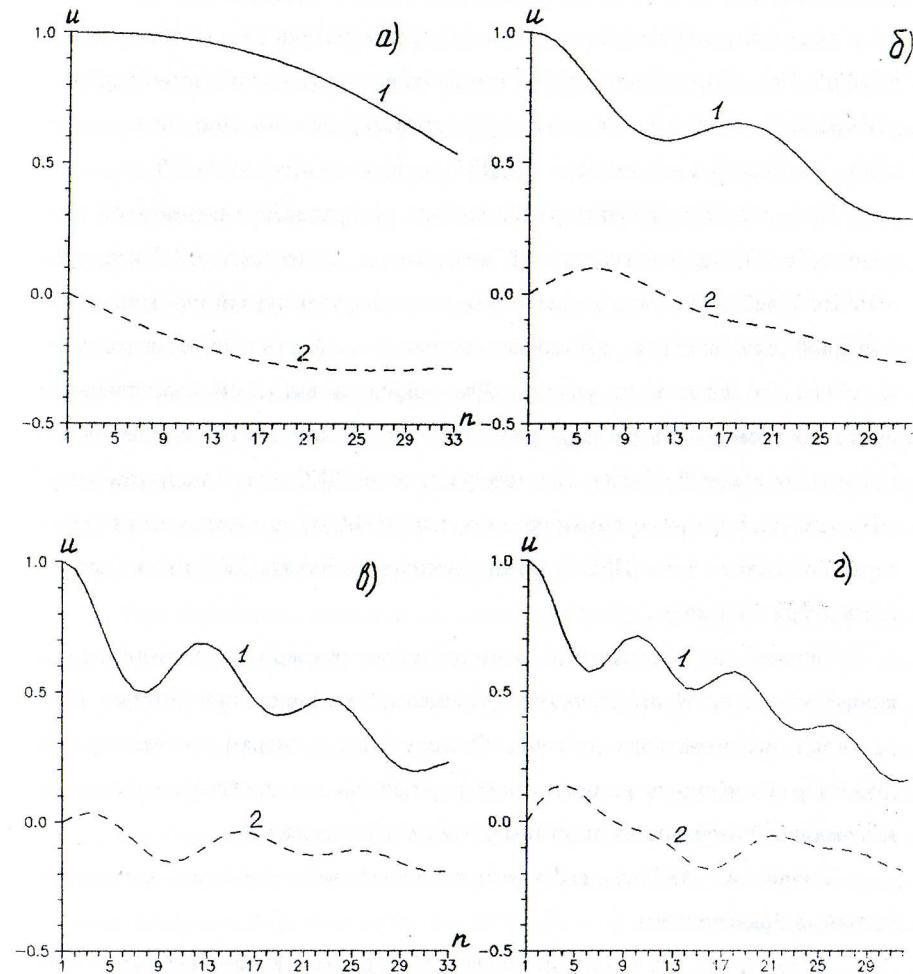


Рис. 7. Распределения осевой (1) и радиальной (2) компонент смещения на плоской поверхности выпуклой пьезопластины переменного радиуса из керамики ЦТБС-3,  $h/l=1$  ( $\alpha=45^\circ$ ): а -  $l/a=0,6$ ,  $n=4$ ,  $k=0,33$ ; б -  $l/a=0,26$ ,  $n=7$ ,  $k=0,34$ ; в -  $l/a=0,16$ ,  $n=10$ ,  $k=0,34$ ; г -  $l/a=0,12$ ,  $n=13$ ,  $k=0,34$

пьезокерамики второго типа (НБС-1, ТБКС, ТБК-3) изготовление пьезопластины в виде выпуклой пластины ухудшает характеристики квазитолщинных колебаний. При изготовлении из этой керамики вогнутых пьезопластин переменного радиуса удается значительно улучшить распределения компонент смещения на излучающей поверхности, но ДКС повышается всего на 2 - 4 %.

Показано, что улучшить равномерность распределения нормальной компоненты смещения на излучающей поверхности и повысить ДКС квазитолщинных колебаний можно только с помощью двояковыпуклой или конически-выпуклой пьезопластины, с помощью двояковогнутой или конически-вогнутой пластины это сделать не удастся. Для конически-выпуклой пьезопластины лучшая равномерность распределения нормальной компоненты смещения получается на плоской стороне. Большее увеличение ДКС можно получить в случае пьезопластины из керамики первого типа (ЦТБС-3), для пластины из пьезокерамики второго типа (НБС-1) можно немного увеличить ДКС только первой квазитолщинной моды.

Определены оптимальные геометрические размеры двояковыпуклой и конически-выпуклой пьезопластины переменной толщины, при которых ДКС достигает максимального значения. Оптимальным размерам соответствует и лучшая равномерность распределения нормальной компоненты смещения на излучающих поверхностях пластины (конической и плоской).

#### **Глава 4. Анализ собственных колебаний сложных составных пьезопреобразователей.**

Рассмотрена задача повышения точности расчета и проектирования четвертьволновых пьезопреобразователей с применением современных численных методов, а также - исследования возможной погрешности одномерного приближения. Применение трехмерных моделей для проектирования серии пьезопреобразователей телеметрической системы обусловлено повышенными требованиями к точности обеспечения заданных характеристик преобразователей. Полный расчет преобразователя начинается с анализа его собственных колеба-

ний. Методом конечных элементов решена задача о собственных колебаниях четвертьволнового пьезопреобразователя, состоящего из излучающей грибовидной накладки, секционированного по высоте пьезоцилиндра с осевой поляризацией, тыльной накладки и армирующей шпильки. При проектировании четвертьволновых преобразователей важно, чтобы узел смещения находился в месте жесткого крепления преобразователя. Чтобы обеспечить максимальную эффективность такого пьезопреобразователя место крепления обычно выбирается на накладке там, где она соединяется с пьезоблоком.

При проектировании четвертьволновых преобразователей методом конечных элементов необходим предварительный подбор резонансных частот и исследование форм собственных колебаний отдельных четвертьволновых блоков (излучающей накладки и пьезоблока), что позволяет обеспечить заданную частоту всей конструкции и минимальное значение осевой и радиальной компонент смещения в месте жесткого крепления.

При вычислении резонансных частот грибовидных накладок необходимо учитывать, что излучающий поршень может испытывать деформацию изгиба. Моделирование накладок различной формы показало, что изгибные колебания существенно снижают резонансную частоту; это определяет погрешность анализа в рамках одномерного приближения. Сравнение результатов, полученных методом конечных элементов и одномерным приближением, показывает, что в рассмотренном диапазоне изменения размеров накладки погрешность определения резонансной частоты достигает 30 % при тонких накладках и уменьшается до 5 % с увеличением жесткости поршня. Заметим, что иногда для обеспечения посадочного размера необходимо изменять форму накладки (например, увеличивать толщину поршня на краю), что может привести к появлению изгибных колебаний даже «толстого» поршня.

Получены зависимости, позволяющие определить отклонение резонансной частоты накладки от частоты, соответствующей одномерному приближению для диапазона относительных размеров накладки. Анализ преобразователя

с учетом акустического излучения показывает, что изгибные колебания накладок увеличивают полосу частот при снижении чувствительности.

Активный элемент преобразователя собирается из четного числа пьезокерамических колец (шайб) с осевой поляризацией. Векторы поляризации в двух любых соседних кольцах направлены в противоположные стороны. Секционирование пьезокерамики приводит к изменению её «эффективных» упругих параметров. Преимуществом метода конечных элементов является возможность учета реального количества колец, тогда отпадает необходимость введения «эффективных» параметров. Это важно, если количество секций меньше шести; при разработке высокочастотных пьезопреобразователей оно невелико. При варьировании количества секций и толщины пьезоэлемента эффективная скорость изменяется на 15 % и при двух секциях фактически не определена. Моделирование объемных колебаний секционированного по высоте пьезоцилиндра с произвольной толщиной стенки учитывает указанное изменение скорости.

Получены зависимости эффективной скорости и ДКС секционированного по высоте пьезоцилиндра от количества секций и его длины. Теоретически подтверждено известное из практики положение, что для достижения постоянного значения эффективной скорости количество секций должно быть не менее четырех. Необходимо учитывать, что при измерении эффективных параметров предельные значения эффективной скорости и ДКС будут достигнуты, если число секций не менее четырех и относительная длина пьезоцилиндра (отношение длины цилиндра к его наружному радиусу) не менее четырех.

При анализе собственных колебаний всей конструкции контролируется резонансная частота, распределение смещений на излучающем поршне, величина осевого и радиального смещений в месте закрепления.

Для анализа составных пьезопреобразователей разработан комбинированный метод конечных элементов и плоских волн (аналитических решений). В комбинированном методе накладка или ее часть сложной формы, не соответствующая одномерной модели, описывается конечными элементами. Остальная

(приблизительно одномерная) часть преобразователя описывается аналитическими формулами. В плоскости стыковки одномерной и неодномерной частей преобразователя производится «сшивание» численного и аналитического решений. Пассивная или пьезоактивная одномерная (то есть описываемая одной компонентой) часть преобразователя задается передаточной функцией, которая определяется соответствующей передаточной матрицей. Разработан алгоритм и программа комбинированного метода; блок-схема программы приведена в приложении. Комбинированный метод значительно сокращает время счета, но дает более грубые результаты, то есть представляет собой компромиссный вариант. Его можно использовать при анализе составных преобразователей в общем трехмерном случае, когда количество узлов и уравнений велико.

Для расчета чувствительности в режиме излучения, полосы частот и характеристик направленности необходим расчет пьезопреобразователя с учетом акустического излучения.

#### Глава 5. Анализ акустического излучения пьезопластин и пьезопреобразователей конечных размеров в экране.

Акустическое излучение круглых пьезопластин и составных четвертьволновых преобразователей с накладкой рассмотрено в пятой главе. Для решения этих задач разработан комбинированный численно-аналитический метод, в котором осесимметричный пьезопреобразователь, излучающий пассивным или пьезоактивным круглым поршнем радиуса  $a$  в абсолютно жестком плоском экране, моделируется конечными элементами, а акустическое поле в жидком полупространстве описывается аналитически.

В комбинированном методе система уравнений метода конечных элементов (4) описывает пьезопреобразователь, расположенный в нижнем полупространстве  $z \leq 0$ . Потенциал скорости в жидкости (верхнем полупространстве) должен удовлетворять уравнению Гельмгольца в цилиндрических координатах

$$\partial^2 \varphi / \partial z^2 + \partial^2 \varphi / \partial r^2 + r^{-1} \partial \varphi / \partial r + k^2 \varphi = 0, \quad z \geq 0.$$



с учетом акустического излучения показывает, что изгибные колебания накладок увеличивают полосу частот при снижении чувствительности.

Активный элемент преобразователя собирается из четного числа пьезокерамических колец (шайб) с осевой поляризацией. Векторы поляризации в двух любых соседних кольцах направлены в противоположные стороны. Секционирование пьезокерамики приводит к изменению её «эффективных» упругих параметров. Преимуществом метода конечных элементов является возможность учета реального количества колец, тогда отпадает необходимость введения «эффективных» параметров. Это важно, если количество секций меньше шести; при разработке высокочастотных пьезопреобразователей оно невелико. При варьировании количества секций и толщины пьезоэлемента эффективная скорость изменяется на 15 % и при двух секциях фактически не определена. Моделирование объемных колебаний секционированного по высоте пьезоцилиндра с произвольной толщиной стенки учитывает указанное изменение скорости.

Получены зависимости эффективной скорости и ДКС секционированного по высоте пьезоцилиндра от количества секций и его длины. Теоретически подтверждено известное из практики положение, что для достижения постоянного значения эффективной скорости количество секций должно быть не менее четырех. Необходимо учитывать, что при измерении эффективных параметров предельные значения эффективной скорости и ДКС будут достигнуты, если число секций не менее четырех и относительная длина пьезоцилиндра (отношение длины цилиндра к его наружному радиусу) не менее четырех.

При анализе собственных колебаний всей конструкции контролируется резонансная частота, распределение смещений на излучающем поршне, величина осевого и радиального смещений в месте закрепления.

Для анализа составных пьезопреобразователей разработан комбинированный метод конечных элементов и плоских волн (аналитических решений). В комбинированном методе накладка или ее часть сложной формы, не соответствующая одномерной модели, описывается конечными элементами. Остальная

(приблизительно одномерная) часть преобразователя описывается аналитическими формулами. В плоскости стыковки одномерной и неодномерной частей преобразователя производится «сшивание» численного и аналитического решений. Пассивная или пьезоактивная одномерная (то есть описываемая одной компонентой) часть преобразователя задается передаточной функцией, которая определяется соответствующей передаточной матрицей. Разработан алгоритм и программа комбинированного метода; блок-схема программы приведена в приложении. Комбинированный метод значительно сокращает время счета, но дает более грубые результаты, то есть представляет собой компромиссный вариант. Его можно использовать при анализе составных преобразователей в общем трехмерном случае, когда количество узлов и уравнений велико.

Для расчета чувствительности в режиме излучения, полосы частот и характеристик направленности необходим расчет пьезопреобразователя с учетом акустического излучения.

#### Глава 5. Анализ акустического излучения пьезопластин и пьезопреобразователей конечных размеров в экране.

Акустическое излучение круглых пьезопластин и составных четвертьволновых преобразователей с накладкой рассмотрено в пятой главе. Для решения этих задач разработан комбинированный численно-аналитический метод, в котором осесимметричный пьезопреобразователь, излучающий пассивным или пьезоактивным круглым поршнем радиуса  $a$  в абсолютно жестком плоском экране, моделируется конечными элементами, а акустическое поле в жидком полупространстве описывается аналитически.

В комбинированном методе система уравнений метода конечных элементов (4) описывает пьезопреобразователь, расположенный в нижнем полупространстве  $z \leq 0$ . Потенциал скорости в жидкости (верхнем полупространстве) должен удовлетворять уравнению Гельмгольца в цилиндрических координатах

$$\partial^2 \varphi / \partial z^2 + \partial^2 \varphi / \partial r^2 + r^{-1} \partial \varphi / \partial r + k^2 \varphi = 0, \quad z \geq 0.$$

На плоской границе раздела ( $z=0$ ): преобразователь-жидкость ( $r \leq a$ ) и абсолют-но жесткий экран-жидкость ( $r > a$ ) должны выполняться граничные условия:

$$v_z(r) = i\omega u_z(r), \quad \{F\} = -\sum_e \iint_{S_e} \{N\} p dS, \quad p = \rho_1 \partial \phi / \partial t, \quad (r \leq a);$$

$$v_z(r) = 0, \quad (r > a),$$

где  $p$  - акустическое давление в жидкости;  $k = \omega/c$ ,  $c$  - скорость звука в жидкости;  $v_z$ ,  $u_z$  - осевые компоненты скорости акустического поля и смещения излучающей поверхности;  $\rho_1$  - плотность жидкости;  $t$  - время;  $\{N\}$  - функции формы конечного элемента на плоскости излучения.

Решение уравнения Гельмгольца записывается в виде ряда по цилиндрическим функциям, которые удовлетворяют соответствующему условию ортогональности. Введена импедансная матрица, которая связывает скорости узловых точек и узловые силы на плоскости излучения. При использовании одномерных моделей пьезопреобразователей импеданс представляет скалярную величину. Если излучающая поверхность представлена совокупностью конечных элементов с узловыми точками, то можно определить собственный и взаимный импеданс каждой точки на поверхности излучения и сформировать импедансную матрицу. Тогда первое уравнение (4) при  $V=1$  можно представить в виде

$$([H_{mm}] - (k_1 a)^2 c_{44} [M] - [S]) \{u_i\} = \{H_{mv}\},$$

где  $[S]$  - комплексная матрица, полученная расширением импедансной матрицы  $[D]$  и содержащая матрицу  $i\omega[D]$  для узлов, выходящих на плоскость излучения. Получены выражения для электрической проводимости пьезопреобразователя, чувствительности в режиме излучения и характеристики направленности.

Комбинированным методом решены задачи об акустическом излучении круглых пьезопластин со сплошными и частичными электродами, круглых пьезопластин нетрадиционной формы: переменного радиуса и переменной толщины (излучающей плоской стороной), составного четвертьволнового пьезопреобразователя. Выполнен полный анализ акустического излучения (чувствительности в режиме излучения, относительной полосы излучаемых частот, диа-

грамм направленности), всех этих пьезопреобразователей. Показано, что круглая пьезопластина из керамики второго типа (НБС-1) обладает большей чувствительностью в режиме излучения и большей полосой излучаемых частот при работе на квазитолщинных модах, чем пластина из пьезокерамики первого типа (ЦТБС-3). Кроме того, у пьезопластины из керамики второго типа меньше уровень боковых лепестков диаграммы направленности; это объясняется тем, что распределение нормальной компоненты смещения на ее излучающей поверхности является более равномерным. Показано, что для круглой пьезопластины с частичными электродами и пьезопластин переменного радиуса и переменной толщины можно получить большую чувствительность в режиме излучения и меньший уровень боковых лепестков характеристики направленности, чем для обычной пластины. Оптимальные геометрические размеры «толстых» пьезопластин, определенные из анализа свободных колебаний пьезопластин, при учете акустической нагрузки практически не изменяются.

Выполнен анализ и оптимизация геометрических размеров составных стержневых четвертьволновых преобразователей с учетом акустического излучения. Исследована зависимость полосы частот и чувствительности в режиме излучения преобразователя с грибовидной накладкой при изменении его основных размеров при фиксированной резонансной частоте и четвертьволновой частоте составляющих блоков. Полученные результаты позволяют выполнить проектирование - определить абсолютные размеры составного четвертьволнового преобразователя для заданной чувствительности и полосы частот, обеспечивая условия жесткого закрепления. Показано, что полосу частот около 20 % можно обеспечить, не допуская изгиба поршня и, соответственно, - снижения чувствительности. Выполнено экспериментальное исследование основных характеристик партии преобразователей для различных частот, рассчитанных по предложенной методике. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов подтверждает более высокую точность расчета и проектирования сложных пьезопреобразователей при использовании численных методов. Полученные

результаты использованы для разработки серии четвертьволновых пьезопреобразователей, что подтверждено актом о внедрении.

**Глава 6. Анализ акустического излучения водозаполненного пьезоцилиндра, расположенного возле плоскости.**

В шестой главе рассмотрено акустическое излучение водозаполненного пьезоцилиндра, расположенного возле бесконечной абсолютно жесткой плоскости, с учетом их акустического взаимодействия. Такая задача принципиально не может быть решена в рамках одномерного приближения. В известных работах, в которых различными методами (и обычно при наличии упрощающих допущений) решены подобные задачи, исследуются водозаполненные цилиндры, расположенные в бесконечном пространстве, влияние конструктивных элементов, морского дна и т. п. не учитывается. Показано, что наличие жесткой плоскости, расположенной на небольшом волновом расстоянии от пьезоцилиндра, которой можно приближенно моделировать металлические конструктивные элементы или скальное морское дно, значительно искажает характеристики излучения водозаполненного цилиндра. Кроме того, в рабочую полосу частот может попасть первая антисимметричная мода, которая также искажает частотные характеристики пьезоцилиндра. Для того чтобы обладать полной информацией о возможности уменьшения влияния антисимметричной моды, рассчитаны полные спектры пульсирующих колебаний пьезоцилиндра с тангенциальной и радиальной поляризацией из двух составов пьезокерамики (ЦТБС-3 и НБС-1) с учетом как симметричных по высоте цилиндра мод, так и антисимметричных. Ранее (в монографии [1] и других работах) были рассчитаны и проанализированы только симметричные по высоте пьезоцилиндра моды, так как только такой тип колебаний возбуждается в одиночном пьезоцилиндре со сплошными электродами, находящемся в бесконечном пространстве.

На рис. 8 приведены полные спектры низших симметричных и антисимметричных мод секционированного (тангенциально поляризованного) пьезоцилиндра из керамики ЦТБС-3; симметричные моды обозначены буквой  $s$  с ин-

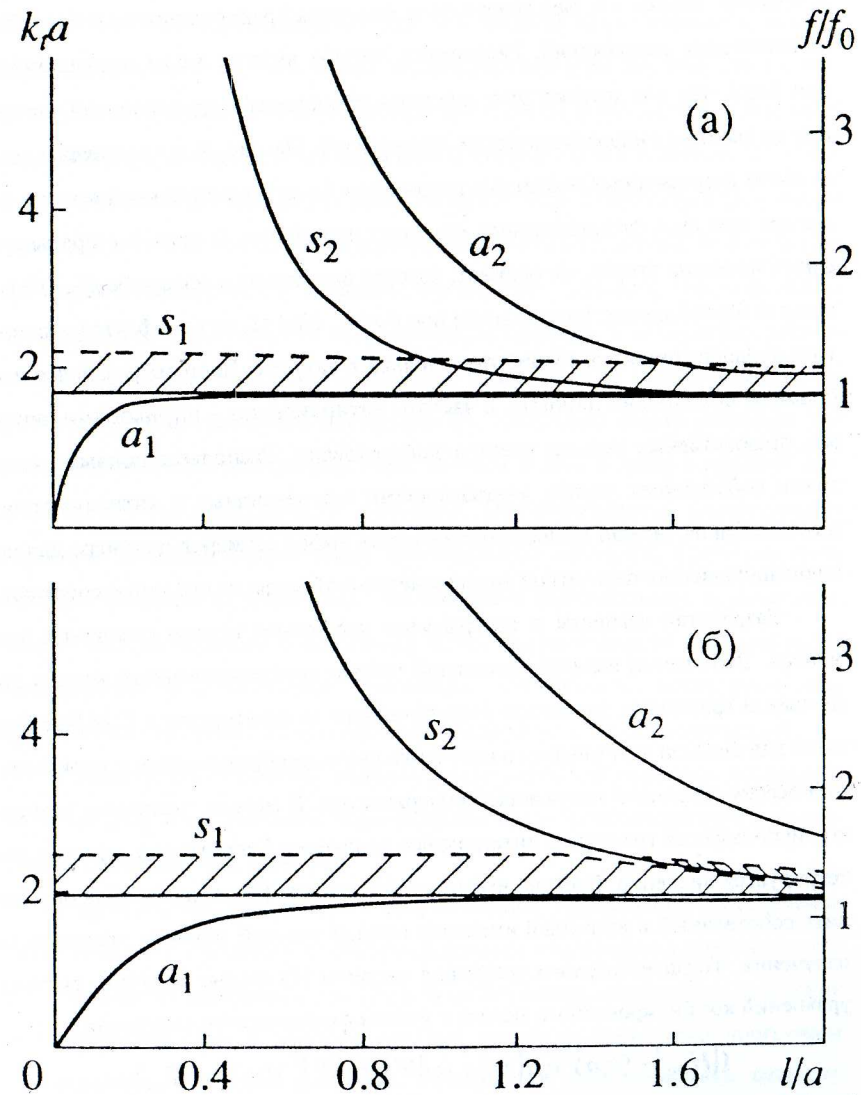


Рис. 8. Полный спектр собственных частот низших симметричных и антисимметричных колебаний секционированного пьезоцилиндра из пьезокерамики ЦТБС-3: а —  $h/a=0.1$ ; б —  $h/a=0.3$

дексом, антисимметричные – буквой  $a$ . Высота цилиндра –  $l$ , внешний радиус –  $a$ , толщина стенки –  $h$ . Вся поверхность цилиндра предполагается свободной от механических напряжений. Рассчитаны четыре низшие моды пьезоцилиндра при  $l/a \leq 2$ , так как именно этот диапазон представляет практический интерес при разработке гидроакустических излучателей. На рис. 8 представлены зависимости безразмерных частотных параметров  $k_1 a$  от относительной высоты цилиндра при двух фиксированных толщинах его стенки. С правой стороны графиков нанесена вторая ось ординат, которая выполнена в масштабе  $f/f_0$ , где  $f_0$  – частота первой симметричной моды при  $l/a \ll 1$ ,  $h/a \ll 1$ , то есть фактически частота пульсирующих колебаний пьезокольца в вакууме. Частоты резонанса изображены сплошными линиями, а частоты антирезонанса – штриховыми линиями; пьезоактивные участки спектра заштрихованы. Располагая полными спектрами собственных частот, учитывающими симметричные и антисимметричные колебания, можно правильно обосновать выбор размеров цилиндра для исключения влияния паразитной антисимметричной моды на его характеристики.

Разработан алгоритм и программная реализация метода граничных элементов. Этот метод является составной частью комбинированного метода конечных и граничных элементов разработанного (в соавторстве с С.М. Балабаевым) для анализа акустического излучения пьезопреобразователей с произвольной осесимметричной излучающей поверхностью. В методе граничных элементов используется граничное интегральное уравнение Гельмгольца, которое интегрируется численно. Введена импедансная матрица  $[Z]$ , позволяющая определить собственный и взаимный импеданс каждой узловой точки на поверхности излучения. Тогда из первого уравнения системы (4) можно получить систему уравнений комбинированного метода с учетом акустического излучения

$$([H_{mn}] - (k_1 a)^2 c_{44} [M] + i\omega [W][Z][W]^T) \{u_i\} = \{H_{nv}\},$$

где  $[W]$  – матрица направляющих косинусов нормали к поверхности излучения.

Комбинированным методом решены задачи об акустическом излучении водозаполненного пьезоцилиндра с тангенциальной и радиальной поляризации

ей, расположенного возле бесконечной абсолютно жесткой плоскости. Рассчитаны все основные характеристики водозаполненных пьезоцилиндров, находящихся возле плоскости, – частотные характеристики чувствительности в режиме излучения и активной составляющей акустической мощности, диаграммы направленности, распределения нормальной составляющей колебательной скорости и давления на цилиндрических поверхностях. Полученные результаты сравнены с соответствующими результатами для пьезоцилиндра, находящегося в бесконечном пространстве. Показано, что наличие плоскости, находящейся на малом волновом расстоянии от пьезоцилиндра, приводит к асимметрии распределения нормальной компоненты скорости и давления на цилиндрических поверхностях водозаполненного пьезоцилиндра. Особенно сильно искажает эти распределения антисимметричная мода, которая может попасть в рабочий диапазон частот водозаполненного цилиндра. Неравномерность распределения скорости и давления ограничивает максимальную мощность излучения из-за появления больших механических напряжений в пьезоцилиндре и кавитации. Наличие полных спектров собственных частот пьезоцилиндров с учетом антисимметричных мод позволяет обосновать возможность исключения или уменьшения их влияния на характеристики гидроакустических излучателей.

В заключении изложены основные результаты проведенных исследований по анализу и оптимизации характеристик пьезопреобразователей с произвольным соотношением размеров.

В приложении представлено разработанное программное обеспечение метода конечных элементов и комбинированных численно-аналитических методов: блок-схема программы для анализа собственных колебаний и излучения пьезопреобразователей в плоском жестком экране и блок-схема программы комбинированного метода конечных элементов и аналитического решения (плоских волн) для анализа четвертьволновых пьезопреобразователей. Также представлен текст программы по расчету собственных колебаний круглой пьезопластины, тексты подпрограмм, которые используются в этой программе.

входной и выходной файлы.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны трехмерные компьютерные модели пьезопреобразователей различного назначения с произвольным соотношением размеров. На основе метода конечных элементов, метода граничных элементов и их комбинации с аналитическими методами разработаны алгоритмы и программы для анализа осесимметричных преобразователей, содержащих пьезоактивные и пассивные конструктивные элементы. Комплекс программ позволяет анализировать как собственные колебания пьезопреобразователей, так и работу преобразователя с учетом акустического излучения в жидкость. При анализе собственных колебаний определяются частоты резонанса и антирезонанса, динамический коэффициент электромеханической связи (ДКС), распределения компонент смещения в объеме и на поверхности преобразователя – формы колебаний. При анализе преобразователя с учетом акустического излучения определяются частотные характеристики чувствительности в режиме излучения, электрической проводимости и акустической мощности, а также рабочая полоса частот, характеристика направленности и распределения колебательной скорости и давления на излучающих поверхностях. Комплекс программ позволяет решать задачи анализа, оптимизации геометрических размеров пьезопреобразователей и их проектирования на основе трехмерных компьютерных моделей.

2. Выполнен анализ собственных колебаний круглых пьезопластин с полными и частичными электродами (неоднородным электрическим возбуждением), пьезопластин нетрадиционной формы: переменного радиуса и переменной толщины, а также биморфных пьезопластин с двумя типами закрепления, совершающих изгибные колебания. Определены пределы применимости и погрешности одномерных моделей этих пьезопластин. Определены пьезоактивные участки спектра, то есть участки, которые эффективно возбуждаются приложенным электрическим полем. Показано, что колебания толщинного типа конечной круглой пьезопластины имеют непоршневое синфазное распределе-

ние нормальной компоненты смещения по радиусу пластины; такие колебания названы квазитолщинными. Квазитолщинные колебания формируются четвертой, седьмой, десятой, тринадцатой и последующей модами. При проектировании пьезопреобразователей необходимо учитывать следующее. ДКС квазитолщинных мод принимает максимальное значение при определенных относительных размерах пьезопластин – оптимальных размерах, которые различны для пластин из пьезокерамики различных составов. ДКС квазитолщинных мод меньше статических коэффициентов связи, рассчитанных по одномерной теории и приведенных в справочниках. При изменении номера квазитолщинной моды изменяется распределение нормальной компоненты смещения на поверхности пластины и при оптимальных размерах пьезопластины квазитолщинная мода наиболее удалена от соседних радиальных мод. Полученные результаты позволяют также эффективно планировать экспериментальные исследования в области разработки высокочастотных пьезопреобразователей.

3. Предложена классификация всех составов пьезокерамики на два типа на основе анализа особенностей спектров собственных частот и форм колебаний круглых пьезопластин. Для каждого типа пьезокерамики получены оценки ДКС через соответствующие статические коэффициенты связи, приведенные в справочниках. Важность такой классификации заключается в том, что она определяет составы пьезокерамики, для которых можно повысить эффективность возбуждения мод применением неоднородного электрического возбуждения или изменением формы пластины. Предложенная классификация полезна для систематизации отдельных известных и противоречивых экспериментальных результатов по использованию пьезопластин с частичными электродами.

4. Получены зависимости резонансных частот круглых биморфных пьезопластин с двумя типами закрепления от их относительной толщины с учетом двух компонент смещения; проверено их соответствие известным аналитическим приближениям. Определены пределы применимости одномерных аналитических приближений для определения резонансных частот. Отмечено, что

для первой моды свободно опертой пьезопластины сплошные электроды являются практически оптимальными; при помощи частичных электродов ДКС увеличивается незначительно. В случае же жестко закрепленной биморфной пьезопластины частичные электроды позволяют значительно повысить эффективность преобразования энергии и увеличить ДКС в десятки раз; определены оптимальные относительные размеры электродов.

5. Предложено техническое решение проблемы улучшения характеристик квазитолицинных колебаний круглых пьезопластин применением пьезопластин нетрадиционной формы: переменного радиуса и переменной толщины. Анализ собственных колебаний пьезопластин нетрадиционной формы показал, что, изменяя геометрическую форму пластины, можно корректировать распределение осевой компоненты смещения на излучающей поверхности пластины, уменьшая амплитуду ее осцилляций, при этом уменьшается радиальная компонента смещения и повышается ДКС. Возможность изменения распределения компонент смещения на поверхности излучателя важна при проектировании пьезопреобразователей, так как распределение смещений определяет величину ближней зоны и уровень боковых лепестков.

6. Разработан комбинированный численно-аналитический метод (и выполнена его программная реализация) решения «сквозной» задачи акустического излучения в жидкость осесимметричного пьезопреобразователя, излучающего круглым поршнем в жестком экране при реальном распределении смещений на поверхности излучения. Комбинированным методом решена соответствующая задача и выполнен анализ акустического излучения круглых пьезопластин из керамики ЦТБС-3 и НБС-1, работающих на квазитолицинных модах. Анализ чувствительности в режиме излучения, относительной полосы частот и диаграмм направленности показал, что при оптимальных размерах пьезопластин, определенных из условия максимума ДКС, достигается максимальная чувствительность в режиме излучения и максимальная ширина полосы излучаемых частот. Характерно, что максимальное значение нормированной чувствитель-

ности в режиме излучения примерно одинаково для всех квазитолицинных мод и зависит только от пьезокерамики, из которой изготовлена пластина. Для пьезопластин из керамики второго типа (НБС-1), чувствительность в режиме излучения и полоса частот больше, чем у пластины из пьезокерамики первого типа (ЦТБС-3). Кроме того, для пьезопластин из керамики второго типа меньше величина боковых лепестков характеристики направленности, что объясняется более равномерным распределением нормальной компоненты смещения на излучающей поверхности.

7. Выполнен анализ акустического излучения круглых пьезопластин нетрадиционной формы из керамики ЦТБС-3: выпуклой пьезопластины переменного радиуса и конически-выпуклой пьезопластины переменной толщины, а также круглой пьезопластины с частичными электродами. При анализе собственных колебаний пьезопластин показано, что для этих пластин можно получить больший ДКС и более равномерное распределение нормальной компоненты смещения, чем для обычных пластин. Анализ акустического излучения подтверждает, что в этом случае наблюдается большая чувствительность в режиме излучения и меньший уровень боковых лепестков диаграммы направленности.

8. Выполнен анализ и проектирование серии четвертьволновых пьезопреобразователей различной частоты на основе трехмерных компьютерных моделей. Применение численных методов обусловлено повышенными требованиями на обеспечение заданных параметров преобразователей. Анализ пьезопреобразователей состоит из анализа собственных колебаний и расчета преобразователей с учетом акустического излучения в жидкое полупространство. При анализе собственных колебаний показано, что предварительный подбор резонансных частот накладки и пьезоблока позволяет расположить узел осевого смещения и минимизировать радиальное смещение в месте жесткого крепления преобразователя. Это обеспечивает заданную резонансную частоту и максимальную эффективность работы пьезопреобразователя данного типа при минимальных потерях в креплении. Выполнен анализ собственных колебаний гри-

бовидных накладок с учетом изгибных колебаний излучающего поршня. Показано, что изгибные колебания могут существенно снижать резонансную частоту накладки, поэтому погрешность расчета резонансной частоты излучающей накладки с тонким поршнем по одномерной теории может достигать 30 %.

9. Выполнен анализ с учетом акустического излучения, оптимизация геометрических размеров стержневых четвертьволновых пьезопреобразователей и их экспериментальное исследование. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показывает, что погрешность определения резонансных частот составляет несколько процентов, то есть находится в пределах разброса упругих параметров керамики. ДКС, определенный по экспериментально измеренным частотам резонанса и антирезонанса, соответствует расчету. Полоса частот для опытной партии из шести преобразователей имеет разброс около 10 % и несколько больше расчетной полосы частот, так как при расчете не учитываются потери. Из сравнения расчетных и экспериментальных результатов следует, что метод конечных элементов и комбинированный численно-аналитический метод являются эффективным методом анализа, оптимизации характеристик и проектирования пьезопреобразователей.

10. Разработан комбинированный метод конечных элементов и плоских волн (аналитических решений) для анализа составных пьезопреобразователей. В этом методе накладка (или ее часть сложной формы) моделируется конечными элементами, а остальная часть пьезопреобразователя, совершающая преимущественно продольные колебания описывается аналитически. Комбинированный метод представляет собой компромиссный вариант: он позволяет моделировать сложные трехмерные конструкции, но дает более грубые результаты.

11. Методом конечных элементов решены задачи о собственных колебаниях пьезоцилиндров с произвольным соотношением размеров с тангенциальной и радиальной поляризацией. Получены полные спектры собственных частот пульсирующих колебаний пьезоцилиндров с учетом как симметричных по высоте цилиндра колебаний, так и антисимметричных колебаний. Антисиммет-

ричные моды являются паразитными модами и искажают характеристики водозаполненных цилиндрических излучателей. При проектировании пьезопреобразователей антисимметричные моды необходимо учитывать при появлении асимметрии в конструкции преобразователя или в условиях излучения. Знание полных спектров собственных частот цилиндров позволяет обосновать возможность исключения или уменьшения их влияния на характеристики гидроакустических излучателей.

12. Наиболее универсальным методом анализа преобразователей с учетом акустического излучения является комбинированный метод конечных и граничных элементов. Этим методом решены задачи, которые принципиально невозможно решить в рамках одномерных моделей: исследовано акустическое излучение водозаполненного пьезоцилиндра с тангенциальной и радиальной поляризацией, находящегося возле бесконечной абсолютно жесткой плоскости, которой можно приближенно моделировать металлические элементы конструкции, расположенной вблизи пьезоцилиндра, или скальное морское дно. Рассмотрено влияние абсолютно жесткой плоскости на характеристики излучения водозаполненного цилиндра, расположенного на малом волновом расстоянии от нее. Показано, что наличие жесткой плоскости значительно искажает распределения колебательной скорости, давления и частотные характеристики. Особенно большие искажения может создавать паразитная антисимметричная мода, проявление которой обусловлено акустическим взаимодействием пьезоцилиндра и плоскости. Обсуждены способы устранения влияния паразитной антисимметричной моды на характеристики акустического излучения водозаполненного пьезоцилиндра. Разработанный комплекс программ можно использовать для анализа и проектирования более сложных конструкций излучателей на основе цилиндрических пьезопреобразователей.

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Компьютерное моделирование колебаний и излучения тел конечных размеров (методы конечных и граничных элементов). Владивосток: Дальнаука, 1996. 213 с.

2. Ивина Н.Ф. Анализ собственных колебаний круглых биморфных пьезокерамических пластин произвольных размеров. II. Жестко закрепленная пьезопластина//Дефектоскопия. 2001. № 8. С. 45-49.
3. Ивина Н.Ф. Анализ собственных колебаний круглых пьезокерамических пластин переменной толщины//Акуст. журн. 2002. Т.48. № 1. С. 120-122.
4. Ивина Н.Ф. Анализ собствен. колебаний круглых пьезокерамических пластин с частичными электродами//Акуст журн. 2001. Т.47. № 6. С.809-815.
5. Ивина Н.Ф. Анализ собственных колебаний пьезокерамических пластин переменной толщины//Дефектоскопия. 2001. № 6. С. 29-37.
6. Ивина Н.Ф. Корректировка собственных колебаний круглой пьезокерамической пластины изменением ее формы//Дефектоскопия 2000. № 11. С.74-82.
7. Ивина Н.Ф. Численный анализ собственных колебаний круглых пьезокерамической пластин конечных размеров//Акуст. журн. 1989. Т.35. № 4. С.667-673.
8. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М. Анализ собственных колебаний круглых биморфных пьезокерамических пластин произвольных размеров. I. Свободно опертая пьезопластина//Дефектоскопия. 2001. № 8. С. 37-44.
9. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М. Собственные колебания круглых пьезокерамических пластин переменной толщины//Дефектоскопия. 2001. № 1. С.47-55.
10. Ивина Н.Ф., Касаткин Б.А. Нормальные волны в анизотропном пьезоактивном волноводе//Дефектоскопия. 1975. № 4. С.27-32.
11. Ивина Н.Ф., Касаткин Б.А. Численный анализ дисперсионных соотношений для нормальных волн пьезоактивного волновода//Акуст. журн. 1982. Т.28. № 4. С.516-520.
12. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение водозаполненной пьезокерамической оболочки//Акуст. журн. 1999. Т.45. № 3. С.293-300.
13. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение заполненного водой пьезоцилиндра вблизи твердой поверхности//Акуст. журн. 2001. Т.47. № 3. С.297-303.
14. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение конечных пьезопреобразователей в экране//Акуст. журн. 1995. Т.41. № 2. С.181-184.
15. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение цилиндрического пьезопреобразователя с внутренним твердым заполнением//Акуст. журн. 1999. Т.45. № 4. С.450-453.
16. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ пьезопреобразователей комбинированным методом конечных и граничных элементов//Акуст. журн. 1996. Т.42. № 2. С.172-178.
17. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ собственных колебаний пьезокерамических цилиндров произвольных размеров//Прикл. механика. 1989. Т.25. № 10. С.37-41.
18. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ собственных колебаний секционированных пьезокерамических цилиндров произвольных размеров//Акуст. журн. 1988. Т.34. № 1. С.165-167.

19. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ цилиндрического водозаполненного пьезопреобразователя с внутренней упругой перегородкой//Акуст. журн. 1998. Т.44. № 3. С.307-311.
20. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Влияние погрешности комбинированного метода конечных и граничных элементов на результаты расчета основных характеристик пьезопреобразователей//Акуст. журн. 1997. Т.43. № 3. С.299-303.
21. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Собственные колебания конечных пьезокерамических цилиндров//Акуст. журн. 1990. Т.36. № 2. С.204-208.
22. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Численный анализ собственных колебаний пьезокерамических оболочек вращения//Акуст. журн. 1989. Т.35. № 3. С.391-395.
23. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф., Шишлов К.Н. Спектр собственных частот конечной пьезокерамической оболочки//Акуст. журн. 2000. Т.46. № 5. С.702-703.
24. Касаткин Б.А., Ивина Н.Ф. Анализ возможности построения многофункциональных перестраиваемых преобразователей//Дефектоскопия. 1980. № 2. С.96-101.
25. Balabaev S.M., Ivina N.F. Computer modeling and analysis of a cylindrical piezoceramic transducer with interior solid filling//Journ. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. № 4, Pt. 2. P.2196.
26. Ивина Н.Ф. Анализ изгибных колебаний накладок четвертьволновых пьезопреобразователей/Методы и средства гидрофиз. иссл. океана. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1992. С.96-100.
27. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М. Комбинирование аналитического решения и метода конечных элементов для расчета пьезопреобразователей//Научные труды Дальрыбвтуза. Вып. 14, ч. 1. Владивосток, 2001. С.21-24.
28. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Численный анализ собственных колебаний тангенциально поляризованных цилиндров/Антенны и преобразователи. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1988. С.134-141.
29. Ивина Н.Ф. Акустическое излучение пьезопластин конечных размеров//Тез. докл. XI Всесоюз. акуст. конф. Секция «Р». Преобразователи. Прием и излучение звука. М.: Акуст. институт, 1991. С.90-93.
30. Ивина Н.Ф. Особенности спектров собственных частот круглых конечных пьезопластин из пьезокерамики различных составов//Тез. докл. XI Всесоюз. научно-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля», ч. 1. М.: НИИИИ, МНПО «Спектр», 1987. С.38.
31. Ивина Н.Ф. Моделирование колебаний водозаполненного цилиндра комбинированным методом конечных и граничных элементов//Докл. 7 Дальнев. научно-технич. конф. по судов. радиоэл. «Повышен. эффект. разработки произв. и эксплуатаци. радиоэл. систем», Владивосток: ТОВВМУ 1994. С.25-28.
32. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М. Использование метода конечных элементов для анализа и проектирования сложных пьезопреобразователей //Тез. докл. Всесоюз. школы по технич. средствам и методам освоения океана, т. 2. М.: Институт океанологии им. П.П.Ширшова, 1989. С.35.
33. Ивина Н.Ф., Балабаев С.М. Применение комбинированного метода конечных и граничных элементов к анализу акустических преобразователей//



Доклады Российской гидроак. конф. «Современное состояние и перспективы развития теории и прикладных вопросов гидроакустики». Владивосток: ТОВВМУ им.С.О.Макарова, 1996. С.84-87.

34. Ивина Н.Ф., Касаткин Б.А. Численный анализ объемных колебаний анизотропного резонатора произвольных размеров//Тез. докл. Всесоюз. конф. «Использование соврем. физич. методов в неразруш. иссл. и контроле». Хабаровск: ЦНТИ, 1984. С.108-109.

35. Ивина Н.Ф. Анализ эффективности возбуждения собственных колебаний пьезопластин произвольных размеров//Тез. докл. Всесоюз. конф. «Использование соврем. физич. методов в неразруш. иссл. и контроле». Хабаровск: ЦНТИ, 1987. С.179-180.

36. Ивина Н.Ф. Численный анализ собственных колебаний прямоугольных пьезопреобразователей в двумерном и трехмерном приближениях. Там же. С.175-176.

37. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф., Касаткин Б.А. Анализ пьезокерамических цилиндрических преобразователей произвольных размеров методом конечных элементов//Теория направл. и фокусир. акуст. систем//Тез. докл. 4-ая Дальневост. акуст. конф. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. С.86-88.

38. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Влияние акустического взаимодействия между пьезоцилиндрами на основные параметры гидроакустической антенны. Труды VI Всероссийской акустической конференции «Исследование и освоение Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 1998. С.107-109.

39. Ивина Н.Ф. Собственные колебания круглых пьезопластин переменной толщины//Материалы XXXXIII Всерос. науч.-техн. конф., посв. 300-летию воен., воен.-мор. и высш. проф. обр. в России. «Фундам. и прикл. вопр. физ. и математ». Владивосток: ТОВМИ, 2000. Т.2. С.36-38.

40. Ивина Н.Ф., Лихачева В.В. Акустическое излучение радиально поляризован. водозаполненного пьезоцилиндра возле плоскости. Там же. С.39-41.

41. Ивина Н.Ф., Тагильцев А.А. Собственные колебания круглых биморфных свободно опертых пьезокерамических пластин произвольных размеров//Материалы XXXXIV Всерос. науч.-техн. конф. «Фундам. и прикл. вопр. физ. и математ». Владивосток: ТОВМИ, 2001. Т.1. С.16-18.

42. Ивина Н.Ф. Собственные колебания пьезорезонатора типа прямоугольного параллелепипеда/Изд-во ДВГУ: Владивосток, 1987. 12 с. Деп. в ВИНТИ 10.08.87. № 5782-В87.

43. Ивина Н.Ф. Собственные колебания пьезоэлектрических круглых пластин произвольных размеров. М.: Деп. в ВНИИКИ 17.02.87. № 292 кк87.

44. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф., Касаткин Б.А. Собственные колебания цилиндрических пьезопреобразователей произвольных размеров/Дальрыбвтуз: Владивосток, 1986. 13 с. Деп. в ВИНТИ 17.12.86. № 8645-В86.

45. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф., Шишлов К.Н. Полный спектр собственных частот конечного секционированного пьезоцилиндра//Сборн. докл. XXXXII Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. «Фундам. и прикл. вопр. физ. и математ.» Владивосток: ТОВМИ, 1999. Т.2. С.13-15.

Ивина Наталья Федоровна

СТИК АКУСТИЧЕСКИХ  
ЛЬНЫМ СООТНОШЕНИЕМ

В.

ного технического