



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалавр)

На тему Разработка стержневого преобразователя для гидроакустической антенны обнаружения цели при круговом обзоре

Исполнитель Барсукова Анастасия Александровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель д.т.н., профессор
(ученая степень, ученое звание)

Сикарев Игорь Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор технических наук
(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Список сокращений

БО – боковой обзор

ГАП – гидроакустические преобразователи

ГАС – гидроакустические системы

ГЛ – гидролокация

ГЛС – гидролокационные станции

ДМО – донные маяки-ответчики

ИЗ – инструкция по настройке, регулированию и контролю

КД – конструкторская документация

КО – круговой обзор

КПД – коэффициент полезного действия

МКЭ – метод конечных элементов

НГС – навигационные гидроакустические системы

ПН – передняя накладка

РДЧ – рабочий диапазон частот

СГС – средства гидроакустической связи

СО – секторный обзор

ТЗ – техническое задание

ТН – тыльная накладка

ТУ – технические условия

ХН – характеристика направленности

РЕФЕРАТ

Дипломная работа: 60 с., 13 табл., 0 приложений, 29 источников литературы.

СТЕРЖНЕВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ЧАСТОТА РЕЗОНАНСА, ANSYS, ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ, АКУСТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Объект исследования – стержневой гидроакустический преобразователь.

Предмет исследования – анализ конструктивных составляющих и алгоритм работы стержневого преобразователя для опускной антенны.

Цель работы: разработка стержневого преобразователя.

В дипломной работе проводится: расчет стержневого преобразователя для гидроакустической антенны при круговом обзоре в режимах эхопеленгования и шумопеленгования.

Разработан стержневой преобразователь, для гидроакустической антенны при круговом обзоре в режимах эхопеленгования и шумопеленгования.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ.....	8
1.1 Основные сведения о применении звука в воде.....	8
1.2 Гидроакустические системы и их применение.....	9
1.3 Антенны и преобразователи	12
ГЛАВА 2. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАССЧЕТ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	17
2.1 Техническое задание.....	17
2.2 Анализ требований и выбор типа конструкции.....	18
2.3 Выбор размеров элементов конструкции стержневого преобразователя	21
2.4 Построение модели в программе ANSYS	24
2.5 Особенности производства стержневого преобразователя	28
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО РАСЧЕТОВ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	32
3.1 Расчет параметров стержневого преобразователя в ANSYS.....	32
3.2 Порядок испытания стержневых преобразователей	40
3.3 Сравнение результатов расчета с экспериментально полученными параметрами.....	43
ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Электроакустика развивается вот уже более 200 лет. Все началось с наблюдений механических эффектов, связанных с электричеством и магнетизмом.

Звуковые волны на данный момент являются основным средством передачи и получения информации под водой. Звук – единственный вид излучения, распространяющийся в море с наименьшими потерями. Благодаря своим свойствам он стал широко применяться в исследовании океана. В конце 15 века ученый Леонардо да Винчи писал в своих дневниках, что если один конец длинной полой трубы приложить к уху, а другой опустить в воду, то можно услышать звуки кораблей, которые находятся на значительном расстоянии. Изучение происхождения и области применения звука в воде составляет сущность гидроакустики.

Для использования звука в воде необходимо иметь преобразователь для излучения и приема звука. В 1830 году Джозефом Генри были введены в телеграфию электроакустические преобразователи. Он использовал преобразователь с движущимся якорем, в котором переданный сигнал наблюдался при помощи звука якоря, ударяющегося при его остановке.

В 1880 году Жак и Пьер Кюри обнаружили, что при деформации кристаллов кварца на них образуется электрический заряд, т.е. они поляризуются и, наоборот, под действием электрического поля кристаллы изменяют свой размер. Эти явления получили название прямой и обратный пьезоэффект. Открытие магнитострикции и пьезоэлектричества положило началосовременной гидроакустике. В большинстве подводных преобразователях используются материалы с такими свойствами.

В 1944 году советские ученые Б.М. Вул и И.П. Гольдман получили с помощью метода синтеза новый пьезоэлектрический материал – титанат бария. Первые пьезоэлектрические электроакустические преобразователи были

разработаны на его основе. Основными достоинствами таких преобразователей являются:

- Сравнительно большая эффективность;
- возможность изготовления активных элементов сложной формы;
- широкий частотный диапазон;
- возможность возбуждений различных видов колебаний[1].

Благодаря этим свойствам пьезоэлектрические электроакустические преобразователи могут практически полностью удовлетворять требованиям гидроакустических станций.

Много работ посвященных разработке пьезоэлектрических электроакустических преобразователей[1 - 12]. В большинстве работ рассматривается именно создание и расчет стержневого преобразователя[13-20].

Объект исследования – стержневой гидроакустический преобразователь.

Предмет исследования – анализ конструктивных составляющих и алгоритм работы стержневого преобразователя для опускаемой антенны.

Цель работы: разработка стержневого преобразователя.

Для достижения указанной цели необходимо выполнить ряд задачи:

- Разработать общий вид стержневого преобразователя для опускаемой антенны;
- Проанализировать техническое задание проектируемого изделия;
- Рассчитать оптимальные размеры элементов и выбрать материалы для элементов конструкции преобразователя;
- Рассчитать модель преобразователя с применением метода конечных элементов;
- Сравнить результаты расчета с результатами эксперимента.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Основные сведения о применении звука в воде

В большем объеме воды полезный спектр звука составляет примерно от 1Гц до более 1 МГц. В океане возможна связь на тысячи километров, однако частота должна быть ниже 100Гц, так как поглощение звука увеличивается с увеличением частоты. Для любых судов важную роль играет зондирование глубины в мелкой воде. Для этого нужно использовать короткие импульсы на нескольких сотнях кГц, чтобы отделить эхосигнал от излученного.

Подводный звук активно применяется в морской технике. Так, для связи между двумя погруженными подводными лодками требуется излучатель для передачи звука и гидрофон для приема звука на каждой из них. Для гидролокации, как правило, гидрофон и излучатель должны находиться на одном и том же судне, а для пассивного прослушивания требуется только гидрофон. Гидрофоны и излучатели часто используются в больших группах из 1000 или больше преобразователей, плотно упакованных в плоских, цилиндрических или сферических антеннах, установленных на морских судах.

С каждым годом гидролокаторы получают все большее коммерческое применение. Например, знание расстояния от судна до дна важно всем морякам, независимо от их судна. Гидролокатор помогает не только определить глубину воды под судном, но также помогает составить карту дна. На данный момент существуют далеко не все карты 140 миллионов квадратных миль океана Земли. Зондирование нижней поверхности льда важно для проведения подводных лодок под арктическим ледовым покровом. Методы картографии дна можно легко расширить для исследования и поиска затонувших объектов, от судов и обломков самолетов до сокровищ древности. Активные гидролокаторы представляют коммерческий интерес для рыболовной промышленности, где были разработаны специализированные системы для определения местонахождения косяков рыб. Подводные преобразователи могут

даже использоваться для уничтожения личинок mosкитов посредством облучения их ультразвуковой энергией.

Картографирование дна с помощью гидролокатора - важная часть океанографии и его можно расширить до картографирования твердого основания дна и определения характеристик дна. Например, с помощью гидролокатора было изучено дно залива Ресонс, Лонг-Айленд, Нью-Йорк в попытке определить причины уменьшения популяции морских гребешков. Измерения распространения звука можно использовать для моделирования бассейнов океана с использованием гидролокации и томографических методов[21].

Подводный звук полезен во многих областях освоения океана. Точное местоположение отдельных точек или объектов часто крайне важно при проведении разведочного бурения в поисках нефти и газа в глубоком океане или при прокладке кабелей или трубопроводов под водой. Для поиска запасов нефти или газа под дном океана необходима комбинация гидро- и сейсмоакустики. Для проведения военно-морских операций и других подводных проектов важны сетевые системы гидроакустической связи, включающие множество акустических модемов, каждый с излучателем и гидрофоном.

1.2 Гидроакустические системы и их применение

Гидроакустические системы (ГАС) представляют собой совокупность гидроакустических станций, которые используют распространение звука для решения определенных задач. Можно выделить три основные задачи, которые решает ГАС это такие задачи как: задача связи; наблюдения и кораблевождения. В свою очередь каждый комплекс может обеспечивать решение как одной задачи частично, так и всех задач.

Чаще всего гидроакустические станции различают по назначению. К основным назначениям ГАС относятся:

- система гидроакустической связи;

- системы подводного наблюдения;
- системы телеметрии и телеуправления;
- системы кораблевождения;
- системы обеспечения океанографических исследований;
- системы морской геологии и обеспечения подводных промыслов полезных ископаемых;
- системы обеспечения рыболовства и промысла морских животных;
- системы, служащие для контроля и анализа акустических полей судов и параметров другой гидроакустической аппаратуры, оборудования полигонов для подводных объектов, использования в подводном оружии и т.п[1].

Для поиска различных объектов в воде активно применяются ГАС, которые используют метод бокового обзора. Однако этот метод имеет такие недостатки как:

- геометрические искажения, которые возникают при обследовании поверхности с неровным рельефом;
- ухудшение разрешающей способности. Она возникает из-за того, что «мертвая зона» расположена под носителем гидролокатора бокового обзора.

Методы секторного и кругового обзора являются производными от метода бокового обзора в ГАС, предназначенных для обнаружения объектов на морском дне. Их главное отличие заключается в способе обзора пространства. Также стоит отметить, что метод бокового обзора чаще всего имеет лучшую разрешающую способность.

Гидроакустические системы бывают двух классов: активные, пассивные[22]К активным ГАС относятся:

- навигационные гидроакустические системы (НГС);
- НГС с донными маяками-ответчиками (ДМО);
- ГАС миноискания;

- ГАС обнаружения торпед;
- ГАС освещения ледовой обстановки.

Активные ГАС представляет собой устройство, которое формирует гидроакустический сигнал, а затем излучает его в водную среду или на границу ее раздела. Помимо излучения активная ГАС принимает и обрабатывает эхо - сигналы, которые были отражены или же излучены от подводных и надводных объектов. Описываемый процесс также называется эхопеленгованием или активной гидролокацией.

Сейчас активные ГАС применяются не только для военных целей, но также и для гражданских. Их активно используют для освещения ледовой обстановки, поиска и обнаружения айсбергов

К пассивным ГАС относятся:

- ГАС шумопеленгования целей;
- ГАС пассивного определения координат и параметров движения цели;
- ГАС обнаружения сигналов работающих гидролокаторов[1].

Пассивные ГАС - устройство шумопеленгования. Шумопеленгование представляет собой процесс обнаружения и определения координат подводных объектов, которые определяются, как источник шумовых сигналов естественного или искусственного происхождения. Сам сигнал состоит из суммы широкополосных и узкополосных компонентов и импульсных процессов. Основным фактором, который мешает быстро находить цель и определять координаты является реверберация. Поэтому необходимо учитывать ряд факторов таких как: уменьшение интенсивности звуковых волн при многократном отражении; неравномерность распределения, пространственной протяженности цели.

Главным параметром для ГАС является форма характеристики направленности. Именно она определяет назначение ГАС. На рисунке 1

представлена характеристика направленности (ХН) для гидроакустической антенны.

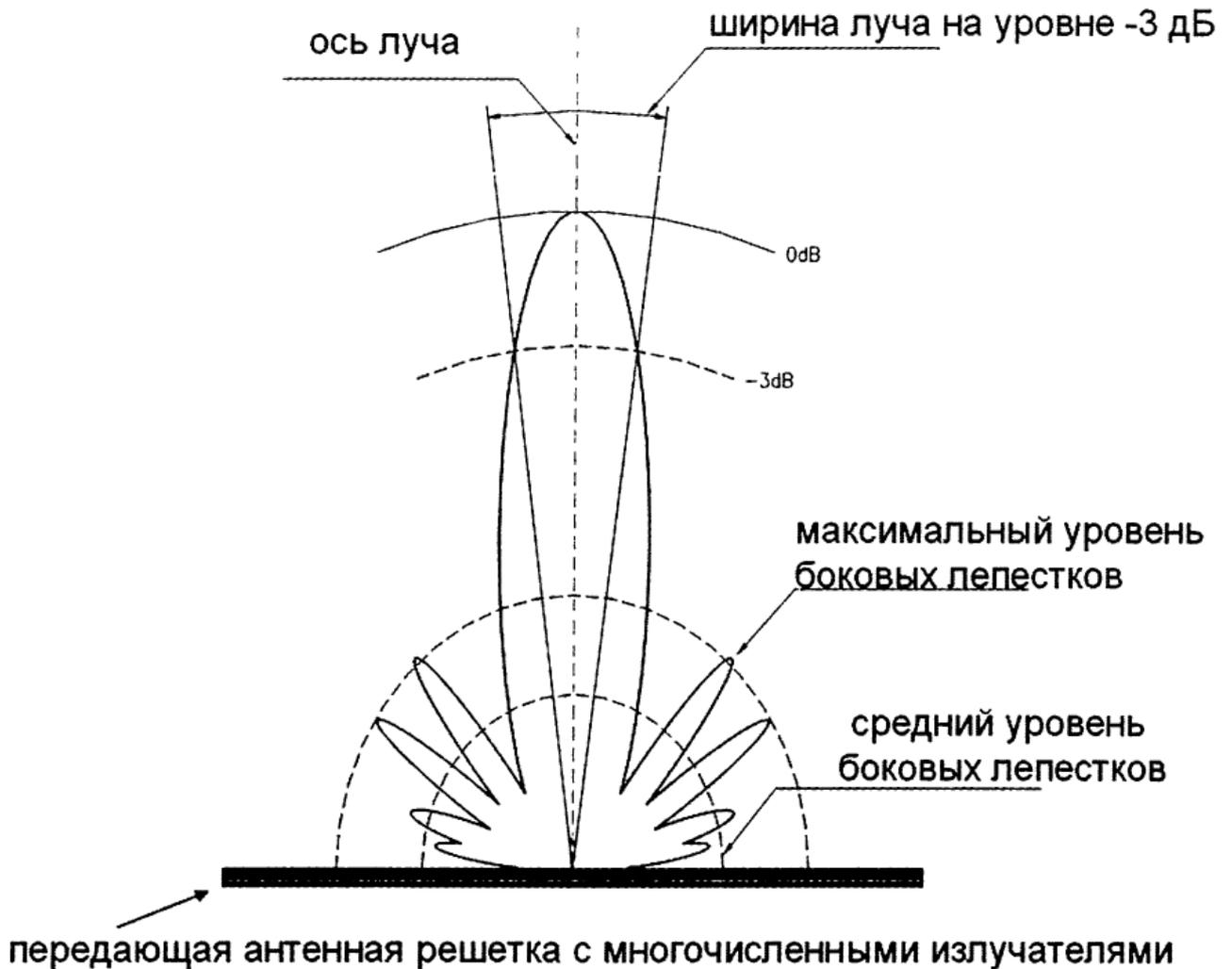


Рисунок 1– Характеристика направленности гидроакустической антенны

На рисунке 1 показано, что ХН имеет несколько лепестков. Лепесток, который имеет самую большую амплитуду называется основным, оставшиеся лепестки называются боковыми.

1.3 Антенны и преобразователи

Гидроакустические антенны играют важную роль в исследованиях моря. Основными задачами антенны являются: излучение и прием акустических сигналов. Гидроакустические антенны определяют тактико-технические характеристики ГАС. К ним относятся такие параметры, как: дальность

действия, пространственная разрешающая способность, сектор обзора и помехоустойчивость. В свою очередь помехоустойчивость и коэффициент концентрации являются основными параметрами, которые определяют направленные свойства антенны[10].

При локации в придонных слоях находят применение антенны, формирующие веерные характеристики направленности. Такие антенны позволяют значительно увеличить площадь и сократить время обзора при сохранении эксплуатационных данных, присущих аппаратуре с узкой характеристикой направленности. Применение такой аппаратуры диктуется требованиями выделения слабых сигналов на фоне объемной реверберации и повышения разрешающей способности (такие антенны должны иметь высокий коэффициент концентрации).

Чаще других в гидроакустике применяются прямолинейные и цилиндрические антенны. В большинстве случаев эти антенны используются для формирования веера или качающихся относительно острых характеристик направленности в азимутальной плоскости. Сканирование или формирование веера ХН такими антеннами осуществляется путем введения по преобразователям с помощью электронной аппаратуры изменяющихся фазовых и амплитудных распределений. Прямолинейные и цилиндрические дискретные антенны допускают осуществление поворота характеристики направленности не только в азимутальной, но одновременно и в угломерной плоскости, однако при этом значительно усложняются конструкция антенны и электронные тракты.

В гидроакустике находят широкое применение плоские антенны с линейно измеряющимся по элементам фазовым распределением. Часто такие антенны называются антеннами с искусственными или компенсированными характеристиками направленности. Распределение фаз по элементам антенны рассчитывают таким образом, чтобы колебания складывались с одинаковой фазой в заданном направлении, называемом направлением компенсации. По

этому направлению ориентируется максимум основного лепестка, все остальные лепестки характеристики направленности тоже поворачиваются.

Многоэлементные цилиндрические антенны применяются для секторного и кругового обзоров. В силу симметрии антенны характеристики направленности получаются идентичными при любой их ориентации в плоскости направляющей цилиндра. Антенны такого типа выполняются в виде замкнутого или части цилиндра (последние называются дуговыми) в зависимости от требуемого сектора обзора. В сравнении с плоскими дуговые и цилиндрические антенны сложнее конструктивно и имеют несколько меньший коэффициент концентрации при равновеликих размерах.

Методы обзора пространства с помощью цилиндрических антенн могут быть различными. В режиме приема обычно формируется статический веер, может осуществляться и электрическое вращение одной или нескольких компенсированных характеристик направленности. Облучение пространства производится круговой или секторной характеристикой, формируемой всем цилиндром или его частью. Возможно также облучение пространства как веером, так и вращающейся ХН.

Основные технические задачи гидроакустики – излучение и прием акустической энергии в морской среде. В гидроакустике, как и вообще в акустике, широко распространены электроакустические преобразователи (ЭАП), от качественных показателей работы которых зависит эффективность действия ГАС различного назначения. Колебательная система подводного электроакустического преобразователя – это совокупность сложных механических систем и электрических цепей, в которой одновременно происходят и взаимодействуют электрические процессы.

Гидроакустические преобразователи (ГАП) представляют собой электромеханоакустические системы, в которых подводимая электрическая энергия преобразуется в механическую, механическая – в акустическую в режиме излучения и в обратном порядке в режиме приема.

ГАП различают по назначению, способу преобразования энергии, структуре механической колебательной системы и формам используемых колебаний, конструкции и др.

По назначению ГАП делят на излучатели, приемники и обратимые универсальные преобразователи. Независимые излучатели и приемники используют в антеннах подводной связи, гидролокаторах, навигационных приборах с отдельными каналами излучения и приема. Универсальные ГАП применяют в аналогичных устройствах при попеременном использовании обоих режимов.

По физическим принципам преобразования энергии ГАП подразделяют на пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, электромагнитные, электроискровые, оптико-акустические и др.

По структуре колебательной системы ГАП делят на пластинчатые, сферические, цилиндрические, стержневые.

Выбор типа преобразователя осуществляется исходя из требований технического задания на разработку, таких как диапазон рабочих частот, резонансная частота, частотные характеристики, характеристика направленности, развиваемое звуковое давление, излучаемая мощность, чувствительность в режиме холостого хода и т.д.

Расчет преобразователя начинают с выяснения ряда вопросов, определяющих его тип. Производится выбор геометрии из условий максимальной простоты конструкции применительно к конкретному случаю.

Одним из самых важных свойств преобразователя является его универсальность, когда один и тот же преобразователь возможно применять в различных антеннах или их составных частях (блоках).

Другими словами, пьезоэлектричество демонстрирует линейную взаимосвязь между механическим напряжением и электрическим полем, в то время как электрострикция демонстрирует нелинейную взаимосвязь между теми же самыми переменными.

Хотя у естественных пьезоэлектрических материалов есть линейный отклик на малые электрические поля, они все же демонстрируют нелинейность, если поле достаточно большое. Природа такой нелинейности - по крайней мере частично - слабая электрострикция, которая имеет место во всех материалах и становится важнее пьезоэлектричества в более сильных электрических полях.

Выпускная квалификационная работа посвящена проектированию стречневых электроакустических преобразователей, используемых в цилиндрических гидроакустических антеннах при круговом обзоре.

ГЛАВА 2. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

2.1 Техническое задание

Разрабатываемый стержневой преобразователь является составной частью опускаемой цилиндрической антенны для гидроакустической станции (ГАС), предназначенной для обнаружения подводных целей в режимах эхопеленгования и шумопеленгования при круговом обзоре в диапазоне от 5,8 кГц до 7,8 кГц. Антенна обеспечивает:

- Излучение зондирующих сигналов;
- Прием эхо – сигналов;
- Шумопеленгование.

Технические требования

1. Рабочая частота преобразователя 7,0 кГц;
2. Излучаемая удельная акустическая мощность одного преобразователя при работе в составе антенны или ее фрагмента должна быть не менее $W_{\text{ак.уд}} = 0,25 \text{ Вт/см}^2$;
3. Электроакустический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{за}}$ должен быть не менее 40%;
4. Максимальное значение чувствительности преобразователя в режиме излучения по напряжению (β) должна быть не менее $10 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}}{\text{В}}$;
5. Ширина полосы пропускания на уровне -3дБ должна быть не менее 10% по частотной характеристике β ;
6. Максимальная глубина погружения прибора до 100м, гидростатическое давление 10^6 Па ;
7. Максимальное электрическое напряжение возбуждения 500 В.
8. По возможности минимизировать весогабаритные характеристики преобразователя;

9. Конструкция преобразователя должна быть разгружена за счет силовой механической развязки, обеспечивающей малое влияние гидростатического давления на параметры преобразователя и отсутствие дополнительных акустических экранов;

10. Конструкция преобразователя должна удовлетворять требованиям по прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам.

2.2 Анализ требований и выбор типа конструкции

Исходя из требований, которые изложены в ТЗ, разрабатываемый стержневой преобразователь должен иметь переднюю и тыльную накладки для того, чтобы обеспечить широкую полосу пропускания, а также оптимизировать весогабаритные характеристики. Чтобы приблизить конструкцию к симметричной необходимо, чтобы тыльная накладка имела массу близкую по массе к передней накладке. Также это обеспечит минимизацию весогабаритных характеристик. Однако для оптимальной добротности необходимо, чтобы тыльная накладка была тяжелее передней. Под оптимальной добротностью понимается такая механическая добротность в воде, при которой электроакустический коэффициент полезного действия имеет максимальное значение. В этом случае внутреннее сопротивление преобразователя наилучшим образом согласуется с сопротивлением излучения рабочей среды.

Чем более легкий материал передней накладки используется и чем меньше ее толщина, тем шире полоса пропускания стержневого преобразователя. Это также зависит от соотношения сечений накладки и активного материала (коэффициента механической трансформации). Для избежания местной концентрации механических напряжений необходимо, чтобы были соблюдены условия плавности перехода поперечных сечений между активными и пассивными элементами колебательной системы.

Активный элемент преобразователя необходимо разделить на секции. Для того чтобы выбрать оптимальный размер секции необходимо учитывать,

что разбиение активного элемента на большое количество секций, включаемых электрически параллельно, возрастают такие характеристики как:

- коэффициент электромеханической трансформации;
- емкость преобразователя.

Однако секционирование ведет к уменьшению таких характеристик, как:

- входное сопротивление;
- напряжение возбуждения;
- абсолютная чувствительность;
- механическая прочность.

Материал для активного элемента необходимо выбрать ЦТБС-3. Этот материал представляет собой пьезокерамику, разработанную на основе цирконата-титаната свинца. Этот материал обладает высоким коэффициентом электромеханической связи, это в свою очередь позволяет получить высокую чувствительность преобразователя как в режиме приема, так и в режиме излучения.

Для того, чтобы повысить механическую прочность необходимо применить в конструкции армирование. Армирование происходит посредством металлической стяжки, которая обеспечивает создание статических напряжений сжатия внутри активного элемента. Оно повышает механическую прочность не только активного элемента, но и всей конструкции в целом. Однако необходимо учитывать, что армирование влияет на параметры преобразователя.

Армирование влияет на такие параметры как:

- пьезомодуль;
- скорость распространения звуковых колебаний;
- диэлектрическая проницаемость;
- резонансная частота;
- эффективный коэффициент электромеханической связи;
- рабочее электрическое напряжение.

В отношении применяемых в конструкциях стержневых преобразователей пассивных материалов, выбор которых производится с учетом обеспечения заданных требований к электроакустическим параметрам преобразователей и выполнения определенных функций (армирование, крепление и т.д.), следует сделать такое замечание: коэффициенты линейного расширения этих материалов, если они жестко сопрягаются (путем склейки) с пьезокерамическими элементами, должны быть достаточно близки к таковому у пьезокерамики. Если это условие не выполняется, то во избежание механического разрушения преобразователя при резком изменении температуры окружающей среды следует вводить в местах сопряжения промежуточные прокладки из соответствующего материала (терморазвязки). Для электрической изоляции между активным элементом и накладками необходимо поместить пластины из стеклотекстолита.

Из всех эксплуатационных нагрузок наибольшее влияние на размер и эффективность антенны оказывает гидростатическое давление. При больших давлениях (более 500м) необходимо корпус делать толстостенным или использовать компенсированную конструкцию с жидкостным заполнением корпуса. В данном случае в конструкции присутствует силовая механическая развязка, которая с одной стороны должна выдерживать полное воздействие со стороны среды на излучающую поверхность передней наклейки преобразователя, а с другой – обеспечивать виброизоляцию корпуса от колебаний механической системы преобразователя. Для выполнения этих условий развязка выполняется с достаточно большим отношением ее длины к площади ее поперечного сечения.

На рисунке 2 представлена схематическая конструкция стержневого преобразователя, выбранного исходя из требований технического задания и особенностей некоторых элементов.

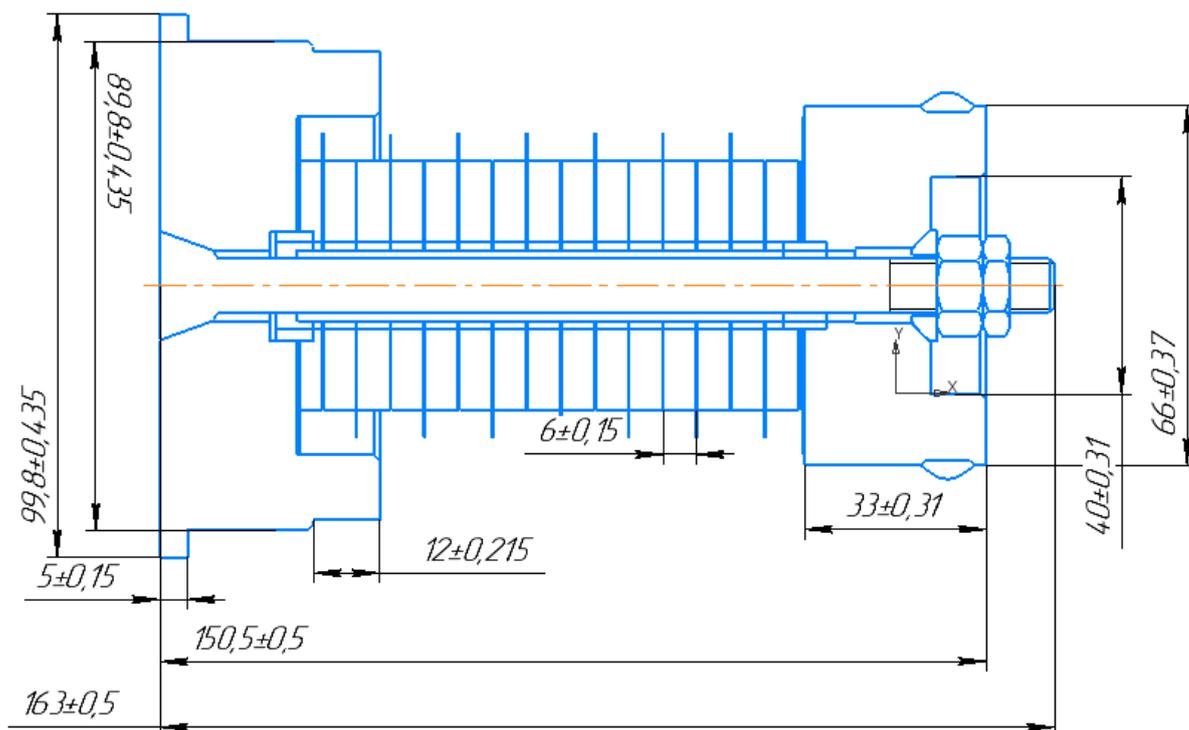


Рисунок 2 – Схематическая конструкция стержневого преобразователя

2.3 Выбор размеров элементов конструкции стержневого преобразователя

Максимальный диаметр излучающей накладке преобразователя определяется ограничениями, которые прописаны в ТЗ. Так, расстояние между центрами преобразователей должно быть не менее 112 мм. Каждый преобразователь имеет свою развязку, это связано с тем, что необходимо минимизировать влияние преобразователей друг на друга, а также чтобы обеспечить возможность введения требуемого амплитудно-фазового распределения возбуждения элементов.

Максимальный размер передней накладки рекомендуется выбирать не более $0,5\lambda$, чтобы избежать трудностей при обеспечении требований к характеристикам направленности прибора, в котором используются преобразователи. Поэтому волновой диаметр передней накладки выбирается не более $0,5\lambda$, равного 0,1026 м.

$$0,5\lambda = \frac{c}{f * 2} = \frac{1600}{2 * 7800}$$

Для обеспечения оптимальной величины эффективного коэффициента электромеханической связи необходимо правильно выбрать волновой размер активного элемента. Он должен находиться в пределах $(0,1 \div 0,2) * \lambda_{п/к}$. В этом случае преобразование энергии происходит в той части пьезокерамики, соответствующей максимальным механическим напряжениям в режиме излучения.

В качестве начальной длины активного элемента берется длина пьезокерамики $L_{п/к} \sim 15$ мм. Далее необходимо выбрать подходящие размеры пьезоэлементов, которые представлены в виде шайб: $d_n=46$ мм, $d_b=16$ мм, толщина 6 мм. Шайбы изготавливаются из пьезокерамики состава ЦТБС-3. Активный пьезоэлемент обеспечивает коэффициент электромеханической трансформации равный:

$$S_{пн}/S_{п/к} = \frac{\pi \cdot 50^2}{\pi \cdot (23^2 - 8^2)} = 5,38$$

Стяжка необходима для того, чтобы обеспечить прочность преобразователей, а также снизить влияние армирования на параметры преобразователя. Стяжка изготавливается из высокопрочного материала Ст40Х. Размеры стяжки необходимо выбирать с учетом того, что необходимо обеспечить статическую податливость в 7 - 10 раз большую, чем статическая податливость активного пьезокерамического элемента с учетом влияния стяжки ($C_{кзкв}$).

Отношение статической податливости стяжки к статической податливости активного элемента для рассматриваемой конструкции равно:

$$C_K = \frac{l_K}{E_K S_K} = \frac{9,5 * 10^{-2}}{14,6 * 10^{-4} * 7,2 * 10^3 * 12,04 * 10^6} = 7,5 * 10^{-10}$$

$$C_{CT} = \frac{l_{CT}}{E_{CT} S_{CT}} = \frac{12,8 * 10^{-2}}{0,785 * 10^{-4} * 7,8 * 25 * 10^9} = 83,6 * 10^{-10}$$

$$C_{KЭKB} = \frac{C_K C_{CT}}{C_K + C_{CT}} = \frac{7,5 * 10^{-10} * 83,6 * 10^{-10}}{7,5 * 10^{-10} + 83,6 * 10^{-10}} = 6,88 * 10^{-10}$$

$$\frac{C_{CT}}{C_{KЭKB}} = \frac{83,6 * 10^{-10}}{6,88 * 10^{-10}} = 12,15$$

Силовая развязка служит для виброизоляции корпуса от активной колебательной системы самого преобразователя. С учетом этого необходимо, чтобы податливость развязки была больше, чем податливости пьезокерамических элементов в более чем 6 раз. Это можно сделать за счет правильного выбора размеров. Также силовая развязка необходима для обеспечения условий, в которых бы не возникал резонанс системы «корпус – развязка - активная колебательная система» в рабочем диапазоне.

Исходя из всего вышесказанного были выбраны следующие размеры силовой развязки: $d_H = 98$ мм, $d_B = 89$ мм, $l = 16$ мм, ($S = 1,32 * 10^{-3} \text{ м}^2$; $C_{CT} = 0,84 * 10^{-8}$ м/Н), материал – смесь резиновая ||| - |а – 8 - С – 572 ТУ

Для того, чтобы конструкция была близка к симметричной необходимо, чтобы тыльная накладка имела массу не сильно больше, чем передняя накладка. Отношение массы тыльной накладки к массе передней равно:

$$\frac{m_{ПН}}{m_{ТН}} = \frac{0,54}{0,75} = 0,72$$

Для расчета параметров гидроакустического преобразователя используется метод конечных элементов.

Метод конечных элементов представляет собой приближенную численную модель для решения задач. Так он базируется на том, что любую непрерывную величину можно заменить (аппроксимировать) другой величиной, которая состоит из полиномов. Произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции, которую, как правило, представляют в виде линейного или квадратичного полинома. Полином выбирается с учетом того, что функция вдоль границ элемента должна сохранять непрерывность.

Для применения метода конечных элементов к решению задач пьезоэлектричества используется вначале переход от обычных постановок в форме начально-краевых задач к обобщенным или слабым постановкам.

Благодаря МКЭ имеется возможность рассмотрения конструкции не как целой модели, а как совокупность конструктивных элементов, которые соединены в узловые точки.

2.4 Построение модели в программе ANSYS

Программное обеспечение Ansys – это универсальная программная система анализа конечных элементов, которая разработана американской компанией ANSYS Inc. Для работы с пакетом ANSYS необходимо иметь базовые знания в области метода конечных элементов. ANSYS применяется для различного рода инженерного анализа: от механики деформируемого твердого тела до гидрогазодинамики, электродинамики и виброакустики.

ANSYS постоянно совершенствуется и меняется, раз в несколько лет выходят новые версии, которые отличаются обхватом решаемых задач, но при этом логика работы в программе не изменяется. Все команды представляются в основном окне в виде дерева, а построение и редактирование геометрических моделей выполняется в модуле PREP7.

ANSYS Mechanical APDL (Ansys Parametric Design Language) – программа, позволяющая создавать сложные расчеты, написанные с условными переходами и циклами на языке APDL. Начиная с 10-той версии ПО ANSYS,

предлагает новую платформу Workbench, которая реализует современный графический интерфейс и позволяет эффективно управлять отдельными модулями и продуктами ANSYS.

Моделирование стержневого гидроакустического преобразователя для дипломной работы производилось в ANSYS Mechanical APDL. Так как на языке APDL удобно создавать макросы для стандартных этапов расчетов, которые возникают при моделировании пьезоэлектрических устройств.

При моделировании преобразователя в ANSYS происходит нумерация всех элементов и узлов. Существует два типа нумерации:

- глобальная или общая - для всей конечно-элементной модели;
- локальная или местная – для внутренних элементов.

Выбирая нумерацию необходимо помнить, что чтобы снизить трудоемкость вычислений необходимо использовать специальный алгоритм – алгоритм оптимизации нумерации.

Чтобы провести расчет полей различных физических величин с помощью метода конечных элементов в нужной области необходимо определить материалы элементов и задать их свойства. Так, в задачах деформирования, необходимо в самом начале указать такие упругие свойства как: модуль упругости и коэффициент Пуассона. В случаях, когда имеется или предполагается пластическое течение необходимо задать истинные диаграммы деформирования, которые аппроксимируются билинейными или мультлинейными кривыми. В случаях, когда тело неравномерно нагрето, необходимо задать механические свойства для ряда температур и ввести коэффициент теплового расширения.

При построении стержневого гидроакустического преобразователя в ANSYS необходимо провести ряд операций. Так, в самом начале необходимо задать типы конечных элементов из библиотеки элементов и определяются реальные константы элементов. Затем задаются материалы и прописываются координаты, с помощью которых строятся элементы конструкции. После

построения необходимо каждой детали присвоить материал. Затем задаются конечные элементы ANSYS для гармонического анализа и определяются граничные условия на поверхностях соответствующих электродов. В конце программы прописываются команды, с помощью которых можно вывести необходимые рассчитанные параметры для дальнейшего анализа. В процессе решения выбирается тип анализа (модальный, гармонический, статический или др.), тип соответствующего выбранному типу анализа решателя, и автоматически производится решение (расчет).

Точность расчета напрямую зависит от правильного выбора типов конечных элементов, их размеров, а также от правильного задания граничных условий, нагрузок и потерь в конструкции.

На рисунке 3 представлена модель стержневого преобразователя с выделенными материалами, которые использовались в процессе создания. Из-за круговой симметрии имеется возможность строить только половину осевого сечения реального преобразователя, что позволяет сократить размер задачи и время, которое будет потрачено на ее решение. Осевая симметрия задается соответствующими командами при выборе типа конечного элемента.

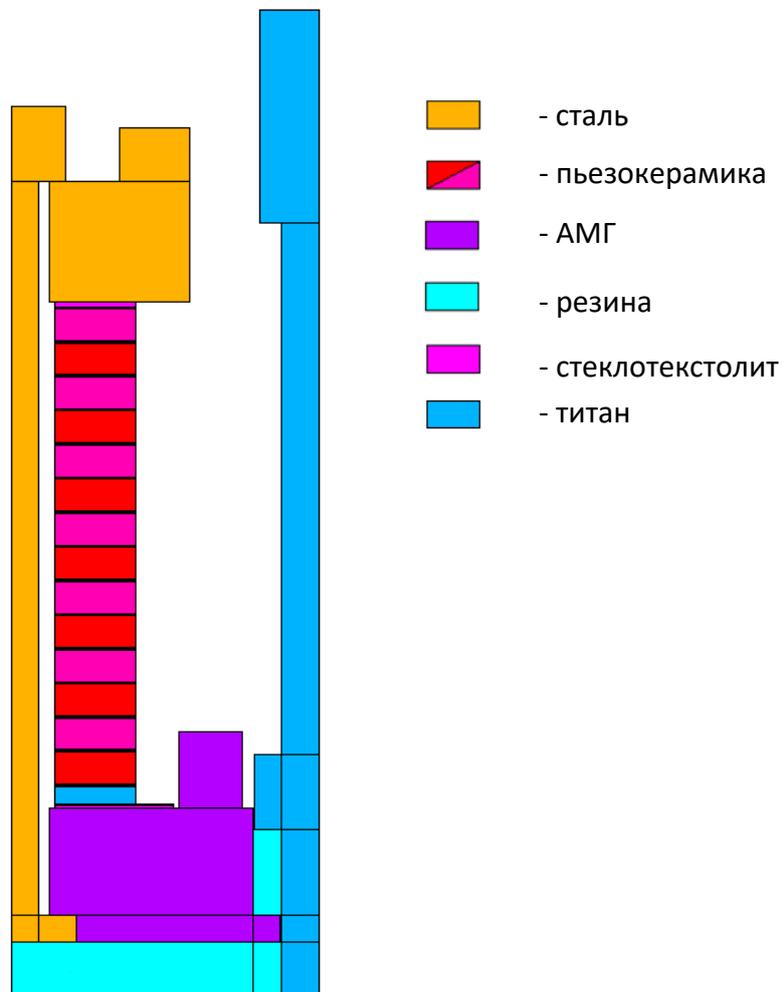


Рисунок 3 - Модель преобразователя в программе ANSYS с используемыми материалами

К торцам шайб из пьезокерамики приклеиваются электроды, к которым прикладывается электрическое напряжение. Соседние пьезокерамические шайбы имеют встречное направление поляризации. Благодаря этому осуществляется параллельное соединение шайб из пьезокерамики, при их электрическом возбуждении. Прикладываемое напряжение возбуждения равняется 1 В.

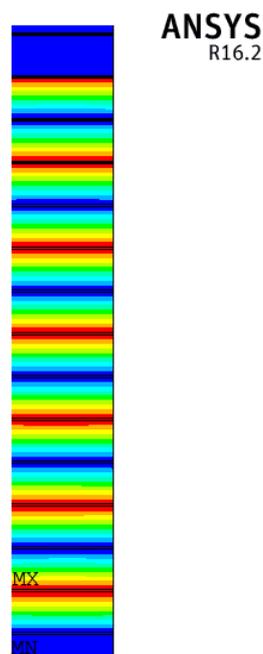


Рисунок 4 - Приложение электрического напряжения

Благодаря ANSYS можно построить модель стержневого преобразователя пригодную для расчета преобразователя в режиме приема, а также в режиме излучения. Сама модель будет иметь максимальное приближение к действительной конструкции преобразователя.

2.5 Особенности производства стержневого преобразователя

Создание стержневого гидроакустического преобразователя является трудоемким процессом. Для его производства необходимо использовать современные материалы, применять современные технологические процессы.

Основными особенностями производства стержневого преобразователя являются:

- 1) Мелкосерийный и индивидуальный характер производства;
- 2) Большая номенклатура деталей и узлов, а также применяемых общих и специальных материалов;

3) Особые требования к применяемым материалам по коррозионной стойкости в морской воде, вибро- и ударостойкости, прочности и т.п.

4) Применение разнообразных технологических процессов;

5) Необходимость обеспечения герметичности забортных устройств и их работоспособности при длительном воздействии гидростатического давления, а также механических и климатических факторов..

6) Большой объем контрольно-измерительных операций в процессе производства и регулировочных работ в процессе и после окончания изготовления аппаратуры.

Основной задачей разработки технического процесса является установление наиболее разумной последовательности сборки или монтажа обрабатываемых деталей, преобразователей, определение типа и количества необходимого оборудования и инструментов, а также установление режимов работы.

Рабочая конструкторская документация включает в себя: чертежи деталей, монтажные и электрические схемы, технические условия (ТУ), а также инструкцию по настройке, регулированию и контролю.

Технические условия (ТУ) представляет собой документ, который содержит обязательные требования к качеству и безопасности производимого продукта, а также к процедуре по проверки их соблюдения.

Последовательность выполнения технологических операций приведена в Таблице 1.

Таблица 1 - Последовательность сборки

Код технологической операции	Наименование технологической операции
T1	Склеивание, электрический монтаж и лакирование блоков элементов

Продолжение таблицы 1

T2	Склеивание преобразователей
T3	Армирование преобразователей
T4	Установка преобразователей в корпус блока
T5	Вулканизация
T6	Электрический монтаж преобразователей в блоке
T7	Финальная сборка блока

У каждой технологической операции есть свои характерные особенности и сложности.

Операция склеивания (T1-T2). Для изготовления преобразователя необходимо произвести склеивание пьезокерамических блоков. Это один из самых ответственных процессов, так как качество склеивания зависит от того из чего состоит клей, как подготовлена поверхность для склеиваемых элементов и от того как быстро происходит отвержение клеящей массы. Клеящие массы чаще всего выбирают на основе эпоксидных смол.

Перед склейкой пьезокерамических элементов нужную поверхность обезжиривают и высушивают на свежем воздухе, а металлические детали помимо этих операций подвергают также пескоструйной обработке.

Для стержневого преобразователя на торцах шайб из пьезокерамики выжигаются электроды, содержащие серебро, к ним приклеиваются электроды из латуни. К ним подводятся электрические напряжения возбуждения через токопроводящие точки эпоксидного компаунда, нанесенных на поверхность электродов.

Операция армирование (T3). Данная операция применяется для повышения механической прочности и эксплуатационной надежности. Армирование происходит посредством металлической стяжки, которая обеспечивает создание статических напряжений сжатия внутри активного элемента. Сжатие фиксируется с помощью гайки и контргайки, которые затягиваются с учетом определенных параметров.

Процесс вулканизации (Т5). Вулканизация – процесс, который превращает пластичный «сырой» каучук в резину. В этом процессе фиксируется форма изделия, повышаются прочностные характеристики каучука, он становится тверже и эластичнее. Вулканизация проводится с целью герметизации корпуса блока преобразователей. От качества данной операции зависят характеристики направленности в данной среде.

Электрический монтаж (Т6) представляет собой

Он представляет собой определённый набор последовательных операций соединения проводниками контактных выводов электроэлементов в единую систему.

Для преобразователей выполняется индивидуальный электрический монтаж.

В условиях мелкосерийного (индивидуального) или опытного производства выполняется индивидуальный электрический монтаж с последовательной укладкой по заданной трассе соединительных проводников и их подпайкой к каждому отдельному выводу преобразователя.

В производстве гидроакустической аппаратуры наибольшее применение получили гибкие провода, жила которых состоит из скрученных луженых проволочек. Выбор изоляции провода зависит от условий эксплуатации и рабочего напряжения.

Сечение проводов выбирают по допустимой плотности тока или по допустимому падению напряжения, учитывая при этом и механическую прочность провода. Для защиты проводов от внешних механических воздействий и для экранировки применяют проволочную плетенку, которая изготавливается из медной луженой проволоки.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО РАСЧЕТОВ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

3.1 Расчет параметров стержневого преобразователя в ANSYS

Построение преобразователя в ПО ANSYS проводилось в несколько этапов. На первом этапе строился и рассчитывался преобразователь в воздухе, то есть без влияния рабочей среды. На рисунке 5 приведена модель преобразователя без корпуса и разбиения сетки. На рисунке 6 с корпусом разбиением сетки.

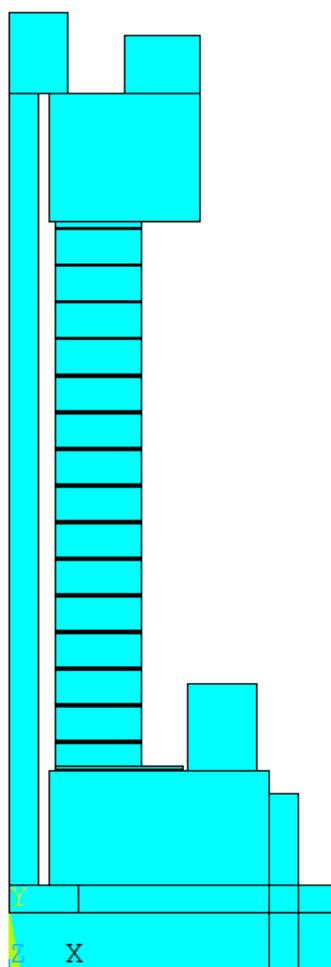


Рисунок 5 – Модель преобразователя без корпуса

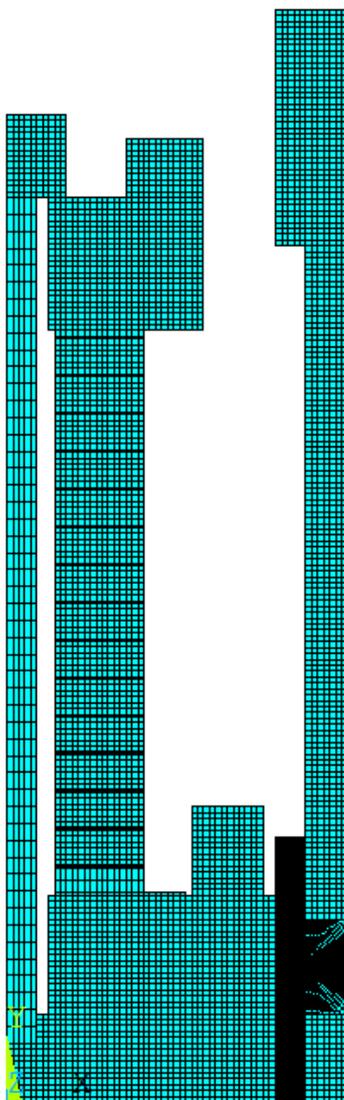


Рисунок 6– Модель преобразователя с корпусом и разбиением сетки

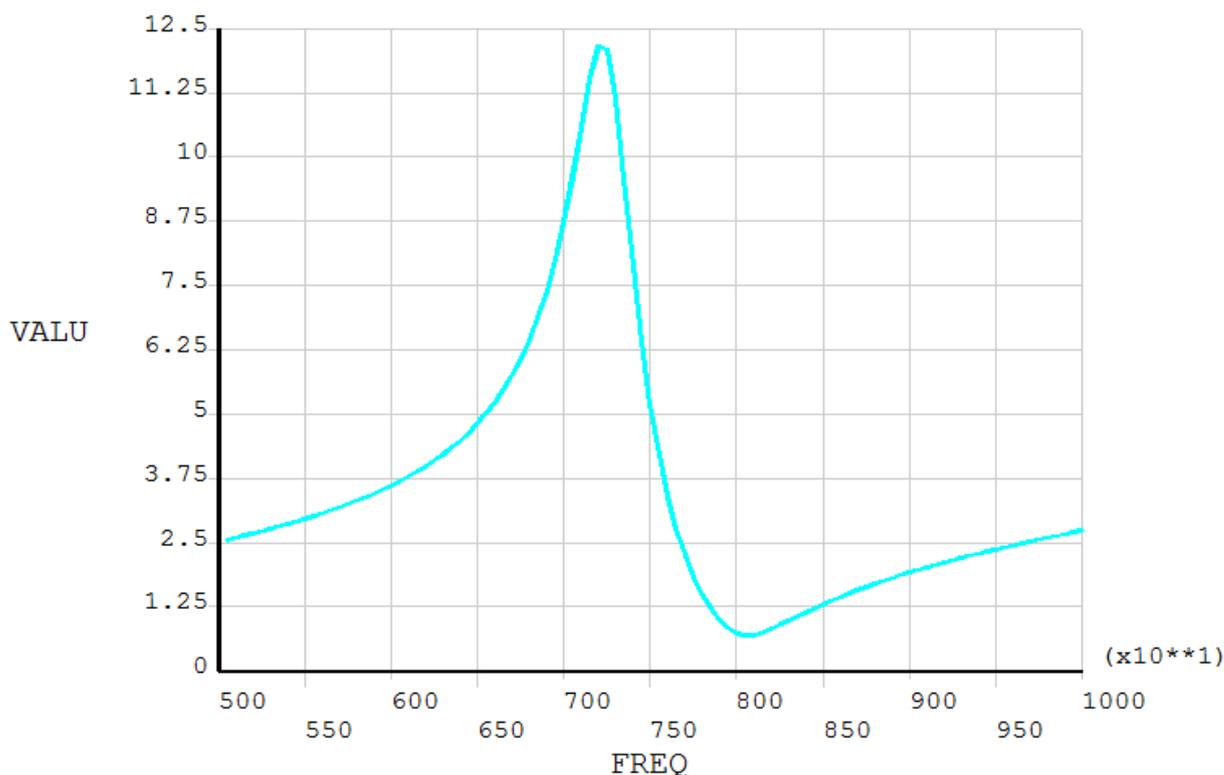


Рисунок 7– Частотная характеристика преобразователя без влияния внешней среды

На рисунке 7 представлен график зависимости частоты от давления. Благодаря нему можно сделать следующие выводы: частота резонанса $f_p = 7,1$ кГц, частота антирезонанса $f_a = 7,95$ кГц. Сопротивление на резонансной частоте $Z_p = 32,1$ Ом. Сопротивление рассчитывается автоматически для каждой частоты с заданным заранее шагом. Его можно посмотреть с помощью команды: «list».

На втором этапе рассчитывается модель преобразователя, помещенного в рабочую среду. Данный расчет реализуется при помощи команд, которые задают необходимые условия, имитирующие воду. Это можно сделать благодаря тому, что в ANSYS имеется возможность рассчитать модель с учетом влияния рабочей среды.

На рисунке 8 представлена модель преобразователя в воде. Размер рабочей среды (R) выбраны с учетом реализации сферического закона распределения звукового давления в дальнем поле.

В данном случае:

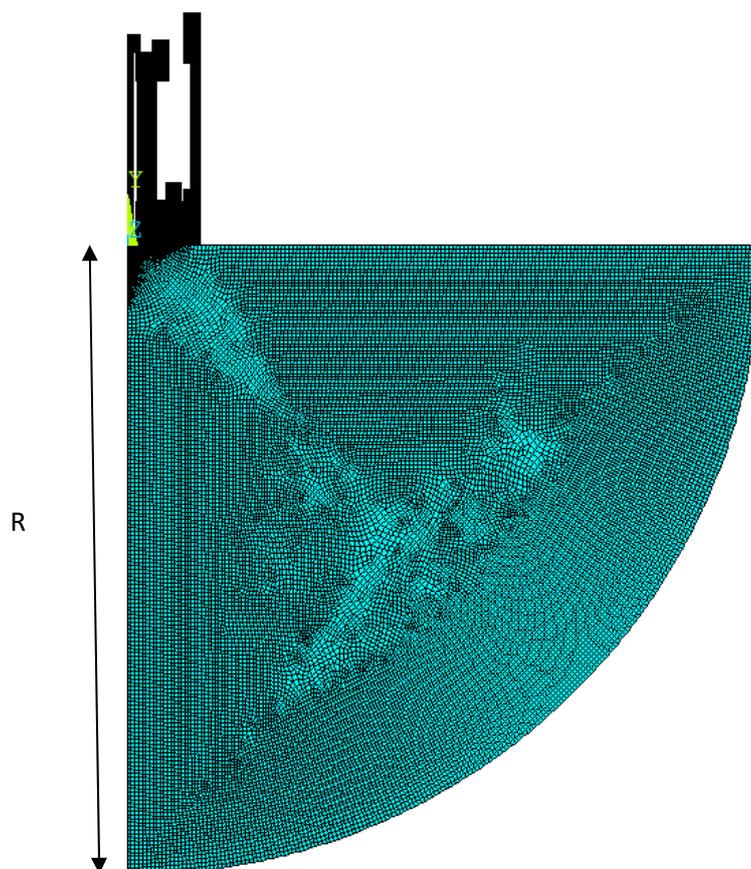


Рисунок 8 - Модель преобразователя в водной среде

На рисунке 8 представлена модель преобразователя в рабочей среде. Все элементы на рисунке разбиты на мелкую сетку. Это делается с целью повышения точности. Чем лучше разбита сетка, тем точнее будут результаты расчета.

На рисунке 9 приведен график частотной характеристики для стержневого преобразователя, находящегося в воде.

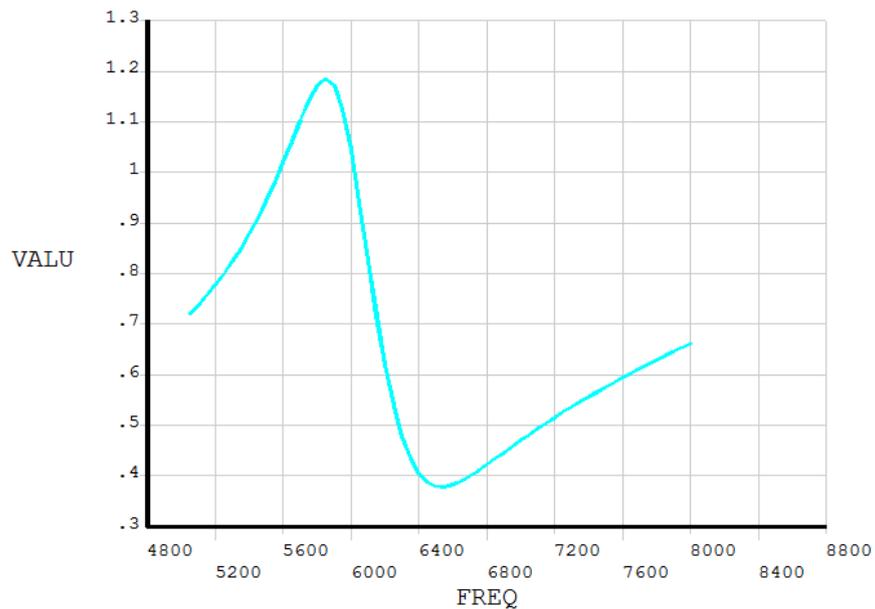


Рисунок 9 - Частотная характеристика входной проводимости преобразователя в водной среде

Исходя из полученных данных: частота резонанса $f_p = 5,83$ кГц, частота антирезонанса $f_a = 6,48$ кГц, сопротивление $Z = 847,5$ Ом, $\cos \varphi = 0,6$.
 $R_w = \frac{Z}{\cos \varphi} = 1412,4$ Ом.

Полезная акустическая мощность $W_{акп}$ при напряжении возбуждения $U_{возб.} = 1$ В и коэффициенте полезного действия $\eta_{эа} = 0,40$, вычисляется по формуле:

$$W_{акп} = \frac{1}{R_w} * \eta_{эа} = 2,83 * 10^{-4} \text{ Вт}$$

Требуемая по ТЗ полезная акустическая мощность будет равна:

$$W_{ак} = W_{уд.ак} * S = 0,25 * 100,2 = 25,05 \text{ Вт}$$

где S – площадь окна.

Электрическое напряжение, обеспечивающее излучение требуемой $W_{ак}$ вычисляется:

$$U_{\text{эл}} = \sqrt{\frac{W_{\text{ак}}}{W_{\text{акп}}}} = 297,5 \text{ В}$$

Соответствующая $U_{\text{эл}}$. напряженность электрического поля

$$E = \frac{U_{\text{эл}}}{d_{\text{эл}}} = 495,5 \text{ В/см}$$

Таким образом, E не превышает предельно допустимого для подобных конструкций значения $E_{\text{доп.}} = 1,1 \text{ кВ/см}$ [4]. По этой величине в соответствии с требованиями ГОСТа выбирается испытательное напряжение при испытаниях на электропрочность в процессе изготовления в производстве.

Видно, что по электрической прочности существует определенный запас, который может быть использован, если позволяет механическая прочность.

По результатам расчета в воде продольные максимальные динамические механические напряжения S_y на частоте f_0 в армирующей стяжке и в пьезоблоке при $U_{\text{возб}} = 1 \text{ В}$ и $U_{\text{эл}}$. оказались равными:

- в пьезоблоке при $U_{\text{возб}} = 1 \text{ В}$ - $S_y = 0,2 \text{ кг/см}^2$ (близко к середине пьезоблока);
- при рабочем $U_{\text{эл}}$. $S_y = 0,2 * 298 = 59,6 \text{ кг/см}^2$;
- в армирующей стяжке при $U_{\text{возб.}} = 1 \text{ В}$ - $S_y = 0,76 \text{ кг/см}^2$ (в перепаде сечений на стыке ПН с головкой стяжки);
- при рабочем $U_{\text{эл}}$. - $S_y = 0,76 * 316 = 240,2 \text{ кг/см}^2$.

По значениям S_y в пьезоблоке выбирается напряжение армирования S_a , оно не должно превышать допустимые статические напряжения для пьезоматериала по ТУ на него.

Статические напряжения в стяжке равны $S_{\text{ст.}} = S_a * A_k / A_{\text{ст.}}$

Статические напряжения в стяжке а также сумма динамических механических напряжений в стяжке и напряжений армирования не должны

превышать допустимые напряжения для материала стяжки стали 40Х, равного 2860 кгс/см^2 .

Для данной конструкции эти условия выполняются.

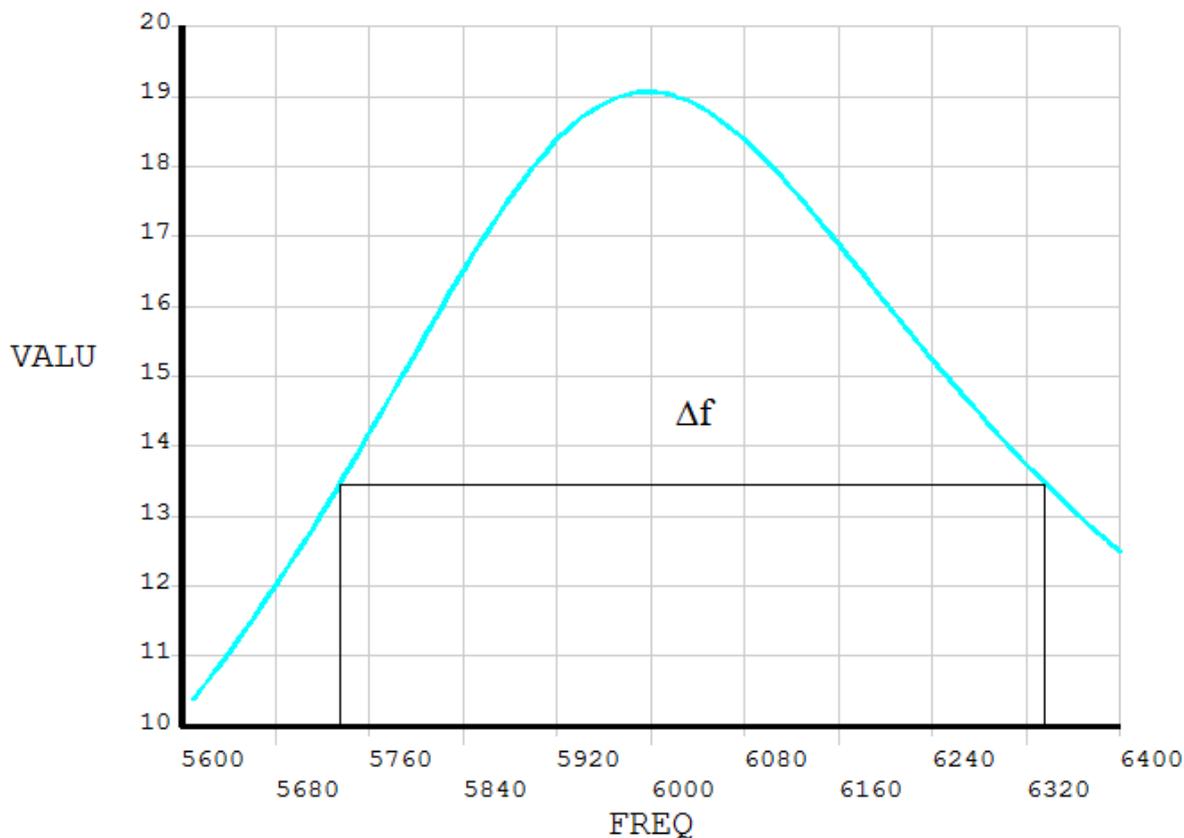


Рисунок 10 - График зависимости давления от частоты с полосной пропускания на частоте резонанса

На рисунке 8 показан график давления от частоты с полосой пропускания Δf на частоте резонанса. Давление на резонансе $\beta = 19,1 \text{ Па} \cdot \text{м/В}$. Для определения полосы пропускания необходимо провести прямую, равную $0,7\beta = 13,37 \text{ Па} \cdot \text{м/В}$, затем определить $\Delta f = 6345 - 5740 = 605 \text{ Гц}$

Механическая добротность преобразователя определяется формулой:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f},$$

где Δf – ширина полосы пропускания

$$Q = \frac{5830}{605} = 9,64$$

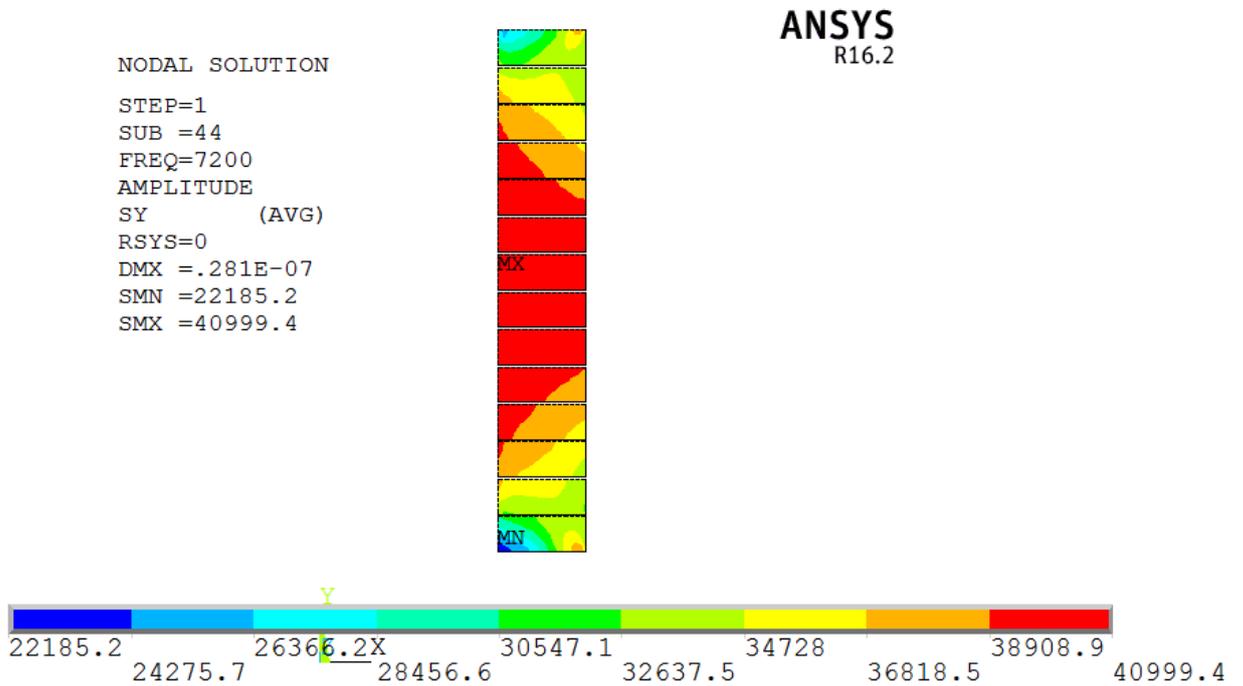


Рисунок 11 – Распределение механического напряжения в столбце

Максимальное значение механического напряжения показано красным цветом. Оно находится между 6 и 7 шайбами от передней накладки.

$$S_{\max 1B} = 41 \text{ кПа}$$

3.2 Порядок испытания стержневых преобразователей

Для измерений параметров преобразователей в воде был изготовлен макет из 4 преобразователей, размещенных в одном герметичном корпусе.

Для каждой технологической операции существует собственная контрольная проверка. В ходе проверки происходит измерение или вычисление параметров изделия и проверка их на соответствие требованиям инструкции по настройке, регулированию и контролю (ИЗ), которая выпускается разработчиком.

Для макета блока, состоящего из 4-х стержневых преобразователей, которые установлены во внутриметаллического герметичного корпуса, было изготовлено 4 преобразователя. Каждый из которых проверялся на соответствие его параметров требуемым.

Далее приведены параметры четырех преобразователей после проверок в ходе сборки. Параметры преобразователей удовлетворяют предъявляемым требованиям по ИЗ. (см. табл. 2)

Таблица 2 – Параметры первого преобразователя при контрольных проверках.

Код провер ки	Параметр							
	измеряемый						рассчитываемый	
	tg δ , %	C _{эл} , пФ	U _г , мВ	f _г , кГц	U _а , мВ	f _а , кГц	K _{св}	Q
K2	0,59	66,966	-	-	-	-	-	-
K3	0,45	64,083	-	-	-	-	-	-
K4	0,53	66,078	22,8	7,16	3,6	8,07	0,45	37
K5	0,7	68,367	21	6,93	3,4	8,46	0,56	23

Таблица 3 – Параметры второго преобразователя при контрольных проверках.

Код провер ки	Параметр							
	измеряемый						рассчитываемый	
	tgδ, %	C _{эл} , пФ	U _г , мВ	f _г , кГц	U _а , мВ	f _а , кГц	K _{св}	Q
К2	0,57	66,330	-	-	-	-	-	-
К3	0,47	65,294	-	-	-	-	-	-
К4	0,53	66,418	28,7	7,24	3,1	8,20	0,46	43
К5	0,65	67,620	22,5	6,99	3,2	8,33	0,53	28

Таблица 4 – Параметры третьего преобразователя при контрольных проверках.

Код провер ки	Параметр							
	измеряемый						рассчитываемый	
	tgδ, %	C _{эл} , пФ	U _г , мВ	f _г , кГц	U _а , мВ	f _а , кГц	K _{св}	Q
К2	0,56	66,213	-	-	-	-	-	-
К3	0,48	65,218	-	-	-	-	-	-
К4	0,53	65,325	28,5	7,25	3,03	8,18	0,41	45
К5	0,65	67,538	22,7	6,94	3,1	7,88	0,46	37

Таблица 5 – Параметры четвертого преобразователя при контрольных проверках.

Код провер ки	Параметр							
	измеряемый						рассчитываемый	
	tgδ, %	C _{эл} , пФ	U _г , мВ	f _г , кГц	U _а , мВ	f _а , кГц	K _{св}	Q
К2	0,55	66,075	-	-	-	-	-	-
К3	0,47	65,066	-	-	-	-	-	-

Код провер ки	Параметр							
	измеряемый						рассчитываемый	
	$\text{tg}\delta$, %	$C_{\text{эл}}$, пФ	U_r , мВ	f_r , кГц	U_a , мВ	f_a , кГц	$K_{\text{св}}$	Q
К4	0,5	65,130	24,1	7,28	3,3	8,17	0,44	41
К5	0,64	67,337	22	6,92	3,5	7,81	0,45	36

Графики частотных характеристик чувствительности отдельных преобразователей в режиме излучения

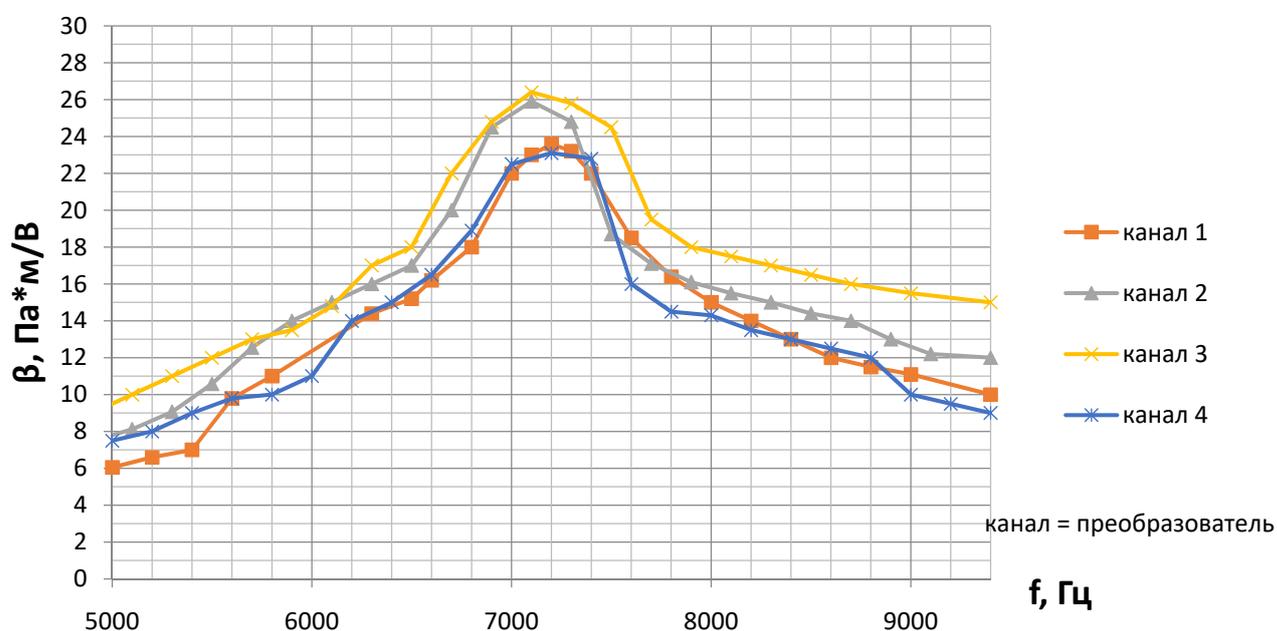


Рисунок 12 – Частотная характеристика чувствительности отдельных преобразователей в режиме излучения.

В Таблице 6 приведены результаты испытаний 4 преобразователей в режиме приема.

Таблица 6. Результаты испытаний 4 преобразователей

№ канала	f_{max} , кГц	β , Па·м/В	$0,7\beta$	Δf , кГц	Δf , %
1 канал	7,2	23,4	16,38	1	13,6

Продолжение таблицы 6

2 канал	7,1	25,9	18,13	0,95	13,1
3 канал	7,1	26,4	18,48	0,9	12,7
4 канал	7,1	23,1	16,17	0,95	13,2

Результаты испытаний наглядно показывают, что каждый из четырех преобразователей удовлетворяет требованиям технического задания.

3.3 Сравнение результатов расчета с экспериментально полученными параметрами

По результатам макетирования и испытания блоков, и входящих в них преобразователей можно сделать выводы о соответствии разработанной конструкции требованиям технического задания. Результаты расчетов и испытаний отдельного преобразователя приведены в сводной таблице.

Таблица 7 – Сравнительная таблица параметров преобразователя

Параметр	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Требования ТЗ
Резонансная частота f_r , кГц	5,76	5,83	$5,8 \pm 0,2$
Ширина полосы Δf , %	12	13	≥ 10
Чувствительность в режиме излучения β на f_r , Па·м/В	10,84	11,8	–
Коэффициент полезного действия $\eta_{за}$	59,9	54,6	≥ 40

ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Данная работа посвящена разработке стержневого гидроакустического преобразователя, который входит в состав опускаемой цилиндрической антенны для гидроакустической станции, предназначенной для обнаружения подводных целей при круговом обзоре в диапазоне от 5,8 кГц до 7,8кГц. Преобразователь предназначен для приема сигналов в составе многоканальной антенны.

Потребители:

Потребителями готовой продукции могут выступать исследовательские институты, нефтегазодобывающие предприятия, Военно-Морской Флот РФ, Военно-Морские Силы других стран, а также корабли и суда других ведомств и т.д.

Место выполнения работы:

Работа выполнена в АО «Концерн «Океанприбор». Данное предприятие занимается созданием гидроакустических комплексов, приборов и систем.

Задачи:

Технико-экономическое обоснование необходимо для того, чтобы дать оценку стоимости разработки и изготовления образца. Как правило, ТЭО выполняется на этапе эскизно-технического проектирования.

Перечень задач ТЭО:

- определение стоимости разработки технической документации;
- определение стоимости образца;
- анализ полученных данных.

Таблица 8 – Ключевые вопросы и комментарии

Ключевые вопросы	Комментарии
1. Наименование продукции	Преобразователь пьезоэлектрический
2. Назначение продукта	Предназначен для решения специфических и военных задач
3. Основные характеристики продукта	<p>Материалы корпусов и отделки:</p> <p>Накладка – АМг5</p> <p>Вставка – Стеклотекстолит</p> <p>Шайба – Стеклотекстолит</p> <p>Пластина – ВТ1-0</p> <p>Элемент пьезокерамический – ЦТБС-3</p> <p>Диапазон измерения: от 5,8 кГц до 7,8кГц.</p>
4. Потребительские свойства продукции	Потребительские качества продукции сопоставимы с характеристиками и свойствами аналогов, реализована возможность создания более современного и надежного преобразователя для замены
5. Основные конкурентные преимущества продукции	Использован другой тип конструкции электроакустического преобразователя
6. Основные потребители и направления использования продукции.	Исследовательские институты и нефтегазодобывающие предприятия
7. Ассортимент и структура выпуска продукции	Ассортимент представлен одним преобразователем

Продолжение таблицы 8

8. Дополнительные сервисные услуги	Гарантийный период обслуживания 10 лет с возможностью дополнительного расширения на 10 лет
------------------------------------	--

Стоимость разработки технической документации на опытный образец изделия определяется по фактическим затратам, произведенным за счет финансовых средств группы разработчиков.

Стоимость разработки конструкторской документации на опытный образец разрабатываемого гидроакустического преобразователя составляет:

$$C_k = C_{эт} + C_p,$$

где C_k – стоимость разработки технической документации на опытный образец изделия;

$C_{эт}$ – стоимость разработки эскизно-технического проекта изделия.

Стоимость разработки эскизно-технического проекта принимаем равной 35,0 тыс. руб;

C_p – стоимость разработки рабочей конструкторской документации изделия.

Стоимость одного человеко-месяца приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Определение стоимости одного чел./мес.

№	Наименование статьи расхода	Согласованный норматив	Стоимость чел./мес., руб.
1	Основная заработная плата (ОЗП) одного чел./мес.	9000,0	9000,0
2	Дополнительная заработная плата (ДЗП)	16 % от ОЗП	1440
3	Отчисления на социальные нужды (с учетом страхового тарифа на обязательное страхование от несчастных случаев на производстве в размере 0,2 %)	26,2 % от суммы ОЗП и ДЗП	2735,28
4	Накладные расходы	145,0 % от ОЗП	13050
5	Себестоимость (1+2+3+4)		26225,28
6	Прибыль	54,4 % от ОЗП	4896
Цена (без учета НДС) (5+6)			31121,28

Расчет стоимости разработки рабочей конструкторской документации на опытный образец изделия

В основе определения стоимости разработки лежит перечень выполненных работ и их трудоемкость. Перечень работ и трудоемкость их выполнения приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень работ и трудоемкость их выполнения

№	Наименование работы	Трудоемкость, чел./мес.
1	Разработка технического задания	0,5
2	Сбор информационного материала	1
3	Изучение литературы	1

Продолжение таблицы 10

4	Вывод основных расчетных соотношений	1
5	Расчет основных параметров антенны	1
6	Разработка конструкторской документации (чертеж эскизов)	1
7	Изготовление макета	2
8	Испытание макета	1
9	Составление отчета	0,5
ИТОГО		9

Таким образом, сметная стоимость разработки рабочей конструкторской документации (без учета НДС) составляет:

$$C_p = T_p * C_p$$

$$C_p = 9 * 31121,28 = 280091,52 \text{руб.},$$

где C_p —стоимость разработки рабочей конструкторской документации;

T_p — общий объем (трудоемкость) разработки рабочей конструкторской документации (в соответствии с таблицей 2);

C_p — цена 1 чел./мес (таблица 1).

Таким образом, стоимость разработки конструкторской документации составляет:

$$C_k = 35\,000 + 280\,091 = 315\,091 \text{руб.}$$

Определение стоимости разработки образца

Себестоимость является одним из важных критериев, который характеризует продукцию. Себестоимость – совокупность всех расходов предприятия на производство и реализацию продукции.

Затраты, которые включает в себя себестоимость:

1. Стоимость сырья;
2. Стоимость вспомогательных материалов на технологические цели;
3. Стоимость энергии и топлива;
4. Затраты, связанные с производством продукции, включающие:
 - 4.1. Материальные затраты и расходы на оплату труда;
 - 4.2. Расходы по контролю производственных процессов и качества выпускаемой продукции;
 - 4.3. Расходы на содержание и эксплуатацию продукции;
 - 4.4. Общезаводские и цеховые расходы.
5. Коммерческие расходы.

Калькуляционные статьи расходов.

В калькуляционные статьи расходов входят:

- сырье и материалы;
- покупные изделия;
- основная заработная плата производственных рабочих;
- дополнительная заработная плата производственных рабочих;
- отчисления на социальные нужды;
- расходы на подготовку и освоение производства;
- амортизация оборудования;
- расходы на содержание и эксплуатацию оборудования;
- общецеховые расходы;
- прочие расходы.

Величина затрат на изготовление того или иного изделия характеризуется его ценой. Цена изделия в свою очередь определяется составлением сметной калькуляции по статьям затрат.

Сырье и материалы

Затраты на сырье и основные материалы представляют собой значительную часть от всех расходов производственных предприятий. Они непосредственно связаны и направлены на осуществление производственного процесса изготовления изделия. Затраты на материалы представляют собой стоимость основных материалов и полуфабрикатов собственного производства, которые необходимы для изготовления данного изделия. Они могут быть определены по формуле:

$$M = \sum_{a=1}^b \partial_a \cdot C_{ма} \cdot K_{Т-за} \cdot \partial_{оп} \cdot C_{оа},$$

где M – стоимость основных материалов, руб;

a – группа основных материалов и полуфабрикатов, применяемых при изготовлении продукции;

b – общее количество групп основных материалов и полуфабрикатов, необходимых для изготовления продукции;

∂_a – расход материалов и полуфабрикатов в количественной форме по каждой группе материалов и полуфабрикатов, кг/изд;

$C_{ма}$ – средняя оптовая цена материалов и полуфабрикатов по каждой группе (а), руб/кг;

$K_{Т-за}$ – коэффициент, учитывающий транспортно – заготовительные расходы;

$\partial_{оп}$ – количественная оценка реализуемых отходов материалов и полуфабрикатов по каждой группе (а), кг/изд;

C_{oa} – средняя цена отходов по каждой группе (а) материалов и полуфабрикатов, руб/кг.

Основные материалы и полуфабрикаты, необходимые для гидроакустического стержневого преобразователя представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет количества и стоимости материалов.

Наименование материала	Единица измерения	Норма расхода	Цена, руб.	Стоимость, руб.
Пьезокерамика ЦТБС-3	шт.	14	680	9520
Титановый сплав ВТ1-0 (ОСТ.1.90013-78)	кг	0,3	2100	630
Резина РС4-НТ (РД 5Р.9574-74)	кг	0,10	500	50
Алюминиевый сплав АМг-5	кг	0,1	250	25
Стеклотекстолит	кг	1,0	78	78
Припой ПОС-61 (ГОСТ 1499-72 ВД)	кг	0,10	65	6,5
Провод монтажный МгШВ	м	0,35	60	21
Клей К-115 (ООП5.9131-94)	кг	0,12	68	7
Смесь резиновая - а – 8 С – 572 ТУ	кг	0,1	550	55
Смазка ЦИАТИМ 201 (ГОСТ 6267 - 94)	кг	0,1	900	90
Трубка Ф – 4Д 1,0*0,2	м	0,2	13200	2640
Итого:				13122
Транспортно-заготовительные расходы, 5%				656,1
Всего:				13778,1

Основная заработная плата производственных рабочих

Основная заработная плата производственных рабочих рассчитывается исходя из средней тарифной ставки и плановой численности с учетом предусмотренных доплат, и премий. Данные по этому параметру, приведены в таблице 12. Однако стоит учитывать, что тарифная ставка зависит от типа предприятия, используемых технологий, оснастки и т.д.

Дополнительная заработная плата производственных рабочих

Дополнительная заработная плата включает в себя:

- оплата очередных отпусков;
- компенсация за неиспользуемый отпуск;
- вознаграждение за выслугу лет и др.

Дополнительная заработная плата составляет 16% от основной заработной платы:

$$Z_d = 0,16 * Z_o = 0,16 * 7786,46 = 1245,83 \text{ руб.}$$

Общая заработная плата производственных рабочих

Общая величина заработной платы определяется суммой основной и дополнительной заработной платы производственных рабочих:

$$Z = Z_o + Z_d = 7786,46 + 1245,83 = 9032,29 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды составляет 26,2 % от общей заработной платы.

$$O_T = 0,262 * Z = 0,262 * 9032,29 = 2366,46 \text{ руб.}$$

Расходы на подготовку и освоение производства

Расходы на подготовку и освоение производства включают:

- Пусковые расходы (расходы на освоение новых производств, цехов и агрегатов);
- Новых видов продукции, которые не предназначены для серийного или массового производства;
- расходы на топливо,
- энергоресурсы и т.п.

Данные расходы составляют 15% от общей суммы прямых расходов:

$$C_p = 0,15 * (Z_o + M + M_{\text{пи}}) = 0,15 * (7786,46 + 13778,1) = 3234,68 \text{ руб.}$$

Амортизация оборудования

Данный вид затрат определяется следующим образом:

$$P_a = \frac{C_{об} * H_a * t}{m},$$

где $C_{об}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации;

t – время, в течение которого работало оборудование;

m – количество рабочих дней в году.

В 2022 году количество рабочих дней составляет 247. Цена оборудования составляет сумму 425 тыс. рублей. Норма амортизации равна 20%. Оборудование работало в течение десяти дней.

Таким образом, величина амортизации оборудования составляет:

$$P_a = \frac{425000 * 0.2 * 10}{247} = 3441,30 \text{ руб.}$$

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования составляет 80% от основной заработной платы производственных рабочих и случае равен.

$$P_c = 0,8 * Z_0 = 0,8 * 7786,46 = 6229,17 \text{ руб.}$$

Таблица 12 – Расчет заработной платы производственных рабочих по тарифу.

Наименование операции	Разряд	Трудоемкость (норма-час)	Тарифная ставка, руб/час.	Расценка, руб.
Фрезерная	3	10	45	450
Токарная	4	50	44,2	2210
Слесарная	4	16	45	720
Сверление	3	1	45,7	45,7
Шлифовка	4	16	45,7	731,2
Комплектация	1	1	44	44
Монтажная	3	8	45,4	366,4
Маркировка	2	2	44	88
Сварка	3	4	46	184
Контроль	4	2,5	46,5	116,25
Сборочная	3	1	45	45
Контроль параметров	5	15	47, 2	708
Итого:		126,5		5708,55
Неучтенные виды работ 10%				570,85
Итого:				6279,4
Доплаты 4%				251,18
Премии 20%				1255,88
Всего:		126,5		7786,46

В общие расходы входят затраты на оплату труда обслуживающему персоналу цеха, текущему ремонту зданий и другие расходы цеха. Они составляют 70% от основной зарплаты производственных рабочих:

$$P_{\text{ц}} = 0.7 * 7786,46 = 5450,52 \text{ руб.}$$

Производственная себестоимость определяется суммированием всех вышеперечисленных затрат и составляет:

$$C_{\text{п}} = M + M_{\text{пн}} + З + O_{\text{т}} + C_{\text{р}} + P_{\text{с}} + P_{\text{ц}} + P_{\text{а}},$$
$$C_{\text{п}} = 13778,1 + 9032,29 + 2366,46 + 3234,68 + 6229,17 + 5450,52 + 6890 = 46981,22 \text{ руб.}$$

Необходимо также учесть расходы, связанные со сбытом продукции, они составляют 10% от производственной себестоимости:

$$P_{\text{пр}} = 0,1 * C_{\text{п}} = 0,1 * 46981,22 = 4698,12 \text{ руб.}$$

Полная себестоимость изготовления антенны для навигационного комплекса равна сумме производственной себестоимости и прочих расходов:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{п}} + P_{\text{пр}} = 4698,12 + 46981,22 = 51679,34 \text{ руб.}$$

Прибыль рассчитывается по формуле:

$$П = 0,5 * M + 0.01 * (C_{\text{к}} + O_{\text{т}} + З) = 0,5 * 13778,1 + 0,1 * (315091 + 2366,46 + 9032,29) = 39538 \text{ руб.}$$

Сметная калькуляция по вышеперечисленным расходам приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Сметная калькуляция

№	Наименование статей	Сумма, руб.
1	Сырье и материалы	13778,1
2	Покупные изделия	0
3	Основная заработная плата производственных рабочих	7786,46
4	Дополнительная заработная плата производственных рабочих	1245,83
5	Отчисление на социальные нужды	2366,46
6	Расходы на подготовку и освоение производства	3234,68
7	Амортизация оборудования	3441,30
8	Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	6229,17
9	Общехозяйственные расходы	5450,52
10	Производственная себестоимость	46981,22
11	Прочие расходы	4698,12
	Себестоимость изготовления образца	95211,86

Конечная стоимость одного стержневого преобразователя составит 410 тыс. рублей. На данный момент в России не существует отечественных аналогов, которые могли бы сравниться характеристиками с данным образцом. Поэтому такой преобразователь будет пользоваться спросом, его изготовление можно считать целесообразным. Для того чтобы снизить себестоимость разработки необходимо снизить ряд показателей таких как: содержание и эксплуатация оборудования; общехозяйственные расходы; расходы на подготовку и освоение производства, а также на прочие расходы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе был проведен аналитический обзор существующих конструкций преобразователей. Разработан общий вид стержневого преобразователя для опускаемой антенны. Выполнен анализ технического задания проектируемого изделия. Рассчитаны оптимальные размеры и выбраны материалы для элементов конструкции преобразователя. Разработана модель преобразователя с применением метода конечных элементов. Выполнено сравнение результатов расчета с результатами эксперимента. Проведено технико-экономическое обоснование.

Таким образом, задачи выпускной квалификационной работы выполнены и цель данной работы достигнута.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л., Судостроение, 1980.
2. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики/ Пер. с англ. - Л.: Судостроение, 1978. - 448с.
3. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. - СПб.: Наука. - 410 с. 177 ил.
4. Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А., и др. Справочник по гидроакустике. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Судостроение, 1988. - 552 с.: ил. - (Библиотеке инженера - гидроакустика). 64
5. Stansfield, D. Underwater electroacoustic transducers / D. Stansfield. – GB: Redwood Press Limited, 1991. – 413.
6. Весна. Справочник по расчету электроакустических преобразователей ЛУЭ-538 281: 1980. - 232с
7. Справочник по гидроакустике / А.Е. Колесников [и др.]; под ред. А.Е.Колесникова. – СПб.: Судостроение, 1982. – 340с.
8. Корякин, Ю.А. Корабельная гидроакустическая техника/ Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В.Яковлев. – СПб.: Наука, 2004. – 410с.
9. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика: Учеб.пособие . - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Судостроение, 1990. - 320 с., ил.
10. Смаришев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. - Л.: Судостроение, 1984 - 292 с.
11. Гутин Л.Я. Избранные труды. Л., Судостроение.1977.
12. Рабинович А.Г. Технология производства гидроакустической аппаратуры / А. Г. Рабинович, Л. А. Рубанов. – СПб.: Судостроение, 1973. – 221с.
13. Р. Дж. Боббер Гидроакустические измерения. Пер. с англ. - М.: Мир, 1974 - 358с.

14. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Судостроение, 1988. - 288 с, ил. - (Библиотеке инженера - гидроакустика).
15. Ковалевский М.А. Специальный лабораторно-вычислительный практикум. Метод конечных элементов: учеб.пособие / М.А. Ковалевский, М.Б. Петров.– СПб.: СПбГУ,1987. – 93с.
16. A depth-dependent formula for shallow water propagation / Формула распространения звука в мелких водах с зависимостью от частоты. JASA, т. 136 №2 Август 2014, с. 573-582.
17. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272с.
18. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров: справ.пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512с
19. Аронов, Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. – СПб.: Энергоатомиздат, 1990. – 272с
20. Подводные электроакустические преобразователи: справочник / В. В. Богородский [и др.]; под ред. В. В. Богородского. – СПб.: Судостроение, 1983. – 248с.
21. Charles H. Sherman, John L. Butler Transducers and Arrays for Underwater Sound / Гидроакустические преобразователи и антенны
22. Физическая акустика. Том I. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – 592с
23. Гийес Л., Сабате П. Основы акустики моря. Пер.с франц. - Л.: Гидрометеорологическое издание, 1967 - 210с.
24. Либенсон Е.Б. Системы эхолокации // 50 лет ЦНИИ «Морфизприбор». СПб.: ЦНИИ «Морфизприбор», 1999. С. 133 – 143.
25. Дымшиц А. М. Системы шумопеленгования в гидроакустических комплексах подводных лодок // Труды выпускников кафедры электроакустики и ультразвуковой техники. СПб.: ГЭТУ (ЛЭТИ), 2001. С. 136 – 148.

26. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1988. 392с.
27. Бушер М.К., Зубарев Л.А. Конструкторско – технологические решения при создании гидроакустических преобразователей и антенн // 50 лет ЦНИИ «Морфизприбор». СПб.: ЦНИИ «Морфизприбор», 1999. С. 324 – 332.
28. Шендеров Е.Л., Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 301с.
29. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308с.