



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Калининградский государственный технический университет»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Л.Л. Кузьмин

**РАСЧЁТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
АНТЕНН И КАНАЛОВ**

Учебное пособие
по курсовому и дипломному проектированию
для специальности 25.05.03
«Техническая эксплуатация
транспортного радиооборудования»
всех форм обучения

Калининград
Издательство БГАРФ
2021

БГАРФ

УДК 681.883
К 89

Кузьмин, Л.Л. Расчёт и проектирование гидроакустических антенн и каналов: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2021. – 152 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования гидроакустических каналов приборов различного назначения (рыбопромысловых эхолотов и гидролокаторов, приборов контроля орудий лова, приборов связи и т. д.). Представлен математический аппарат для расчета параметров гидроакустических каналов, а также конструктивных элементов и электроакустических характеристик гидроакустических антенн.

Настоящее учебное пособие разработано в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Промысловая гидроакустика», предназначено для специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Илл. 24, табл. 28, библи. – 15 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

Рецензенты: *Ермаков С.В.*, канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»;
Рыбаков С.Н., начальник отдела ГМССБ службы связи и ЭРН Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт»

ISBN 978-5-7481-0455-5

© БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021

БГАРФ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Этапы проектирования акустических каналов гидроакустических приборов	5
2. Выбор, обоснование и расчет конструкции электроакустических преобразователей	7
2.1. Условные обозначения параметров	7
2.2. Выбор конструкции электроакустического преобразователя.....	10
2.3. Расчёт армированных преобразователей с накладками	13
2.3.1. Расчет геометрических размеров	13
2.3.2. Расчет электроакустических характеристик	18
2.4. Расчёт клееных преобразователей с накладками	22
2.4.1. Расчет геометрических размеров	22
2.4.2. Расчет электроакустических характеристик	24
2.5. Расчёт преобразователей без накладок	27
2.5.1. Расчет геометрических размеров	27
2.5.2. Расчет электроакустических характеристик	28
3. Расчет энергетических параметров гидроакустического канала	30
3.1. Условные обозначения.....	30
3.2. Предварительный расчет параметров антенны	33
3.3. Расчет необходимой акустической мощности	34
4. Расчет характеристик направленности антенн	43
4.1. Плоские непрерывные антенны	44
4.2. Дискретные антенны	45
5. Синтез характеристик направленности антенн	51
5.1. Синтез характеристики направленности дискретной эквидистантной линейной антенны по методу Дольфа-Чебышева.....	52
5.2. Синтез характеристик направленности дискретной эквидистантной линейной антенны по методу Фурье.....	53
5.3. Синтез характеристик направленности дискретной эквидистантной дуговой антенны по методу Фурье.....	55
6. Конструктивное оформление гидроакустических антенн	58
6.1. Разработка конструкции электроакустического преобразователя	58
6.2. Разработка конструкции антенны	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	67
Приложение 1	69
Приложение 2	76
Приложение 3	82
Приложение 4	95
Приложение 5	108
Приложение 6	126

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования гидроакустических каналов приборов различного назначения: рыбопромысловых эхолотов и гидролокаторов, приборов контроля орудий лова, приборов связи и т. д.

Цель данного пособия – показать курсантам наиболее логичную (с точки зрения конструктора) последовательность выполнения проектных и конструкторских работ, которая приводит к решению поставленных задач при оптимальных затратах временных и материальных ресурсов. Рекомендованная последовательность продиктована целесообразностью принятия тех или иных конструктивных решений на различных этапах проектирования.

Благодаря такой форме изложения материала, большому объему рисунков и расчетных формул, настоящее учебное пособие будет полезным при выполнении как курсового, так и дипломного проектов.

Процесс проектирования гидроакустического канала любого гидроакустического прибора начинается с выбора конструктивных решений, расчета конструкции и электроакустических параметров гидроакустических антенн. После этого проводится расчет параметров акустических каналов в соответствии с заданием на разработку.

В первом разделе дано представление об этапах работ по проектированию гидроакустических каналов рыбопромысловых приборов, изложена последовательность этих работ на каждом из этапов.

Второй раздел посвящен выбору конструктивного решения электроакустического преобразователя. В этом разделе представлен математический аппарат для расчета размеров конструктивных элементов и электроакустических характеристик трех типов преобразователей, часто используемых в конструкциях гидроакустических антенн.

В третьем разделе представлен математический аппарат для расчета энергетических параметров гидроакустического канала, который включает в себя предварительный расчет параметров антенны и расчет акустической мощности, необходимой для локации целей четырех различных типов.

Четвертый раздел посвящен расчету характеристик направленности антенн различных конфигураций, чаще всего применяемых на практике.

В пятом разделе решается вопрос синтеза, в рамках которого по заданной форме характеристики направленности и конфигурации антенны рассчитывается режим ее оптимального возбуждения.

Шестой раздел посвящен вопросам конструктивного оформления гидроакустических антенн. В этом разделе затрагиваются вопросы обоснования выбора конфигурации и материала конструктивных элементов различного назначения, а также некоторые технологические аспекты мелкосерийного производства антенн. Представлен также один из вариантов конструкции дискретной антенны круглой формы.

В приложениях представлены:

- перечни стандартных пьезоэлементов из керамики двух составов;
- 27 вариантов технического задания для курсового проектирования гидроакустических рыбопромысловых приборов различного назначения, а также методические указания (рекомендации), устанавливающие порядок выполнения расчетов в соответствии с изложенными в задании требованиями;
- примеры стандартов и технологических инструкций, регламентирующих производство рыбопромыслового электронного оборудования предприятием изготовителем.

1. Этапы проектирования акустических каналов гидроакустических приборов

Последовательность работ по проектированию и конструктивному решению отдельных элементов акустических каналов гидроакустических приборов вне зависимости от их назначения можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 1.

В соответствии с представленной схемой в работах подобного рода можно выделить следующие этапы:

- а) изучение и анализ требований технического задания; выбор направлений работ;
- б) изучение литературы и конструкторской документации в соответствии с тематикой проектных работ;
- в) предварительный расчёт параметров антенны;
- г) выбор и расчёт конструкции электроакустического преобразователя;
- д) выбор конфигурации рабочей поверхности антенны и режимов её возбуждения и приёма;
- е) расчёт энергетических параметров акустического канала;
- ж) расчёт электроакустических параметров преобразователя;
- з) расчёт электроакустических параметров антенны;



Рис. 1. Схема последовательности выполнения проектно-конструкторских работ

- и) конструктивное оформление антенны;
- к) формирование исходных требований для трактов излучения и приёма проектируемого прибора.

Именно в такой последовательности будут представлены далее все материалы настоящего пособия.

2. Выбор, обоснование и расчет конструкции электроакустических преобразователей

2.1. Условные обозначения параметров

В табл. 1 приведены все величины, которые входят в формулы данного раздела.

Таблица 1

Условные обозначения параметров

<i>Обозначение параметра</i>	<i>Наименование параметра</i>	<i>Размерность</i>
a_i, b_i	Размеры (длина и ширина) поперечного сечения i -го элемента конструкции	м
C, C_0	Электрическая ёмкость	Ф
c_i	Скорость звука в материале i -го элемента конструкции преобразователя	м/с
c_0	Скорость звука в воде	м/с
c_1^E, c_1^D c_3^E, c_3^D	Скорость звука в материале пьезоэлемента при поперечном (индекс 1) и продольном (индекс 3) пьезоэффектах в условиях постоянства напряженности (индекс E) и индукции (индекс D) электрической поляризации	м/с
ρ_0	Плотность воды	кг/м ³
S_i	Площадь поперечного сечения i -го элемента конструкции преобразователя	м ²
D_k, d_i	Наружный и внутренний диаметры i -го элемента конструкции преобразователя	м
d_{31}, d_{33}	Поперечный и продольный пьезомодули	Кл/Н

Продолжение табл. 1

<i>Обозначение параметра</i>	<i>Наименование параметра</i>	<i>Размерность</i>
i	Порядковый номер элемента конструкции	
k_{31}, k_{33}	Коэффициент электромеханической связи для поперечного и продольного пьезоэффектов	
L, L_k, L_n, l_0	Высота преобразователя	м
l_i	Высота i -го элемента конструкции преобразователя	м
L_n	Высота излучающей накладки	м
M_i	Масса i -го элемента конструкции преобразователя	кг
N	Коэффициент электромеханической трансформации	Кл/Н
n	Число пьезоэлементов	
$P_{1м}$	Давление на оси антенны на расстоянии 1 м	Па
Q_m	Механическая добротность	
q	Поправочный коэффициент	
$R_{эп}$	Сопротивление электрических потерь	Ом
R'_m	Активная составляющая механического сопротивления	Ом
$R_{вх}$	Полное активное сопротивление	Ом
f, f_1	Частота	Гц
f_p, f_a	Резонансная частота в режиме излучения и приёма соответственно	Гц
Δf	Полоса пропускания	Гц
h	Расстояние между электродами пьезоэлементов	м
Y_{31}, Y_{33}	Модуль Юнга пьезоматериала для поперечного и продольного пьезоэффектов	Па
X_c	Емкостное сопротивление	Ом
$ Z $	Модуль полного сопротивления	Ом
U	Напряжение возбуждения	В
J	Сила тока	А
W_{ay}	Удельная акустическая мощность	Вт/м ²

Обозначение параметра	Наименование параметра		Размерность
$W_{эл}$	Электрическая мощность		Вт
$\left(\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}\right)$	Относительная диэлектрическая проницаемость		
ϵ_0	Диэлектрическая постоянная вакуума		Ф/м
$\operatorname{tg}\delta$	Тангенс угла диэлектрических потерь		
ν	Декремент затухания		
$\Delta\tau$	Время восстановления чувствительности		С
$\eta_{ам}$	Акустико-механический коэффициент полезного действия		
$\eta_{эм}$	Электромеханический коэффициент полезного действия		
$\eta_{эа}$	Электроакустический коэффициент полезного действия		
$\gamma_{изл}$	Чувствительность по напряжению в режиме излучения		Па/В
$\gamma_{пр}, \gamma_a$	Чувствительность в режиме приёма на частотах резонанса и анти резонанса		В/Па
$\sigma_{арі}$	Механическое напряжение армирования		Па
ρ_i	Плотность материала i -го элемента конструкции преобразователя		кг/м ³
ζ		одностороннем	4
			2
θ	Поправочные коэффициенты при режимах нагрузки		2
			2
g		двустороннем	1
			1

2.2. Выбор конструкции электроакустического преобразователя

Выбор конструкции электроакустического преобразователя в каждом конкретном случае определяется исходными требованиями, изложенными в техническом задании на проектирование. К ним в первую очередь относятся:

а) рабочая частота, которая либо напрямую задается в техническом задании, либо определяется как оптимальная при заданной предельной дальности локации целей с радиусом эквивалентной сферы больших волновых размеров (что практически всегда соблюдается) по формуле (46);

б) ширина характеристики направленности антенны;

в) величина необходимой мощности для локации заданных целей на заданном расстоянии; в этом случае принимается во внимание значение удельной мощности, т. е. отношение излучаемой мощности к площади излучения.

По изложенным далее соображениям в большинстве конструкций гидроакустических антенн электроакустические преобразователи представляют собой стержневую структуру с полуволновым размером для продольных колебаний в материале стержня. Размеры поперечного сечения преобразователей такого типа меньше или сравнимы с длиной волны в материале стержня на рабочей частоте. В этом случае считается, что при заданных условиях торцы стержня при резонансных колебаниях совершают поршневые поступательные движения в продольном направлении с максимальной амплитудой, а в «нейтральном» сечении колебания отсутствуют [10; 12].

Конструкция электроакустического преобразователя в первую очередь зависит от рабочей частоты. Для рабочих частот $f < 150$ кГц используют конструкцию с частотопонижающими металлическими накладками (рис. 2 и рис. 5), поскольку собственная резонансная частота подавляющего большинства стандартных пьезоэлементов много выше частот указанного диапазона. Для рабочих частот $f > 200$ кГц чаще всего подбирают пьезоэлементы, имеющие близкий по частоте резонанс продольных колебаний (их еще называют «толщинными»), то есть используют электроакустический преобразователь вида рис. 7.

При выборе материала и размеров пьезоэлемента необходимо руководствоваться следующими соображениями:

а) материал пьезоэлемента необходимо выбирать таким, чтобы антенна работала с наибольшей эффективностью в заданном режиме (приёма, излучения или совмещённом);

б) толщина пьезоэлемента (размер между электродами), определяющая резонансную частоту продольных колебаний, выбирается, исходя из требований к величине напряжения возбуждения антенны и её входного сопротивления и ёмкости. Например, с уменьшением толщины пьезоэлемента уменьшаются необходимая величина напряжения возбуждения, активное входное сопротивление и чувствительность антенны в режиме приема, при этом входная ёмкость пропорционально увеличивается;

в) поперечные размеры пьезоэлемента должны выбираться такими, чтобы частота его радиальных резонансных механических колебаний была выше рабочей частоты антенны. В противном случае будет сложно управлять частотой преобразователя с помощью частотопонижающих накладок.

Размеры рабочей поверхности антенны определяются, исходя из рабочей частоты и ширины характеристики направленности. Для частот до 50 кГц при ширине характеристики направленности менее 30° полученные размеры не позволяют выполнить активный элемент антенны (электроакустический преобразователь) в моноблочном исполнении, т. е. на базе одного пьезоэлемента. Это вызвано технологическими сложностями производства пьезоэлементов больших размеров, которые в конечном итоге приводят к большому проценту технологического брака на выходе, а значит к значительному увеличению цены готового изделия.

В этом случае целесообразен выбор мозаичной схемы формирования рабочей поверхности (рис. 12). Такую конструкцию формируют из преобразователей с малыми поперечными размерами, которыми заполняют рабочую поверхность антенны, используя их оптимальное размещение.

Таким образом, размеры рабочей поверхности преобразователя определяются размерами пьезоэлемента, выбранного из стандартного ряда (см. Приложение 1), а также требованием оптимального размещения преобразователей по рабочей поверхности антенны.

Рабочая частота антенны в режиме излучения или совмещенном режиме выбирается равной частоте резонанса продольных механических колебаний преобразователя. Однако, как было сказано выше, пьезоэлементов необходимой полуволновой толщины в номенклатуре заводов-изготовителей найти не удастся. Очевидным эффективным решением этой проблемы является введение в конструкцию преобразователя частотопонижающих металлических накладок [9; 10; 12].

Это позволяет уменьшить собственную частоту продольного резонанса преобразователя до нужной величины.

Важнейшим фактором, влияющим на выбор конструкции преобразователя, является удельное значение излучаемой антенной акустической мощности W_{ay} (величина на единицу площади рабочей поверхности). Этот параметр определяется на начальном этапе проектирования [3; 9; 10].

При $W_{ay} \leq 5 \text{ Вт/см}^2$ возможно использование клееной конструкции преобразователя с частотопонижающими накладками (рис. 5) или конструкции без накладок (рис. 7).

Если значение удельной акустической мощности находится в пределах $5 \text{ Вт/см}^2 < W_{ay} \leq 10 \text{ Вт/см}^2$ необходимо использовать армированную (или предварительно напряженную) конструкцию преобразователя, изображенную на рис. 2. Таким образом, допустимое значение удельной акустической мощности, исходя из требования целостности конструкции антенны, принимается равным $W_{ay, \text{ доп}} = 10 \text{ Вт/см}^2$

В случае, когда расчетное значение удельной акустической мощности превышает допустимое значение $W_{ay} > 10 \text{ Вт/см}^2$, необходимо принимать меры по уменьшению этой величины. Если это по каким-либо причинам невозможно, необходимо рассчитать предельно достижимые параметры дальности локации целей при допустимом значении излучаемой мощности и согласовать полученные значения с заказчиком.

Предварительный расчет необходимой акустической мощности выполняется по формулам (47-50). При этом коэффициент осевой концентрации γ приближенно оценивается по формулам (57-63) при $N=1$. В случае мозаичной конструкции антенны полученное значение уменьшается на величину коэффициента заполнения излучающей поверхности η , который обычно имеет величину в пределах от 0,7 до 0,8. Площадь излучающей поверхности антенны оценивается по формулам (66-67), при $N=1$ и использовании указанного выше коэффициента заполнения.

После выбора конструктивного исполнения преобразователя необходимо рассчитать его геометрические размеры и электроакустические параметры. Методика расчёта для трех наиболее часто используемых вариантов конструкции представлена ниже.

2.3. Расчёт армированных преобразователей с накладками

2.3.1. Расчет геометрических размеров

Армированные (предварительно напряженные) преобразователи представляют собой конструкцию из пьезоэлементов и частотопонижающих металлических накладок, стянутых болтом или винтом.

Конструктивное исполнение преобразователя подобного типа и обозначения его элементов представлены на рис. 2.

В конструкцию входят:

– четыре (или любое четное число, начиная с двух) пьезокерамических элемента 3, имеющих форму кольца и продольную поляризацию по толщине; токопроводящие серебряные электроды нанесены методом напыления на торцовые плоскости кольца в условиях завода изготовителя пьезоэлементов;

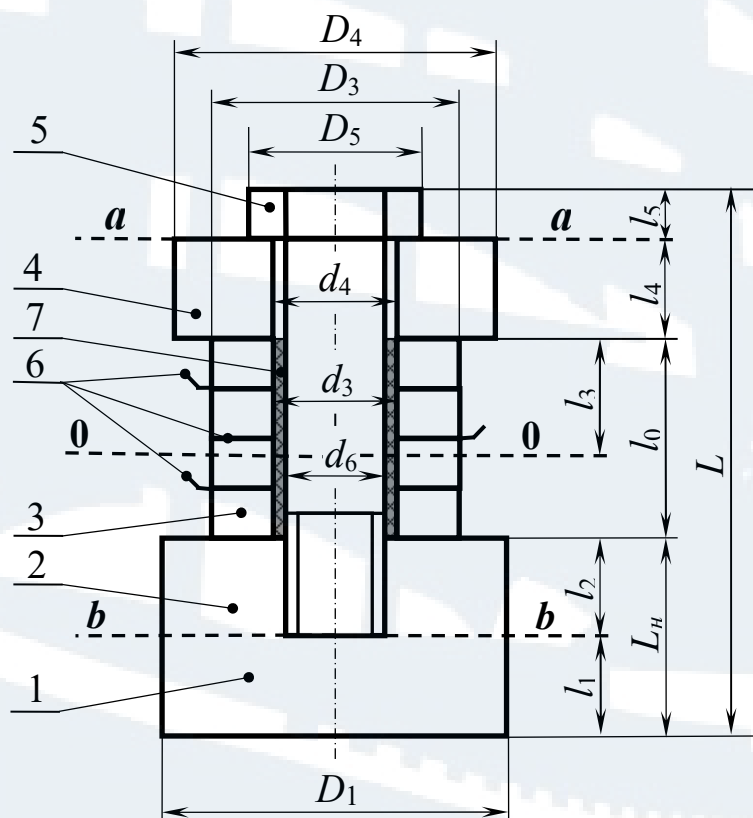


Рис. 2. Конструкция армированного электроакустического преобразователя:

1, 2 – излучающая накладка; 3 – пьезоэлемент; 4 – тыльная накладка; 5 – болт; 6 – медный лепесток; 7 – изолирующая втулка; 00 – нейтральное сечение; a-a, b-b – расчётные сечения

- излучающая 1, 2 и тыльная 4 частотопонижающие металлические накладки, электрически соединенные с одним электродом пьезоэлементов;
- болт 5, соединяющий пьезоэлементы и накладки в общую конструкцию;
- лепесток 6, обеспечивающий электрическое соединение с электродами пьезоэлементов;
- капролоновая (или выполненная из любого механически прочного изоляционного материала) втулка 7, электрически изолирующая пьезоэлементы 3 и лепестки 6 от поверхности болта 5.

В общем случае частотопонижающие накладки могут быть выполнены из разных материалов. При этом необходимо помнить, что амплитуда механических колебаний накладок из более легких металлов (а значит и излучаемая ими мощность) при прочих равных условиях всегда выше, чем у накладок из более тяжелого металла. Помимо этого материал излучающей наклейки должен отвечать требованию наилучшего согласования с рабочей средой – водой, т. е. удельное акустическое сопротивление $(\rho c)_н$ этого материала должно быть по возможности ближе к такому же параметру воды $(\rho c)_в$. Поэтому в качестве материала для рабочей, т. е. излучающей наклейки 1, 2 целесообразно выбрать титановый сплав ВТ1-0 (плотность $\rho_1 = 4,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_1 = 5,1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) [9; 12]. Тем самым изложенные выше требования в достаточной степени будут удовлетворены.

Конечно, можно выбрать в качестве материала для излучающей наклейки и более лёгкий металл, например, алюминиевый сплав. Однако недостаточная коррозионная стойкость (особенно в контакте с другими металлами, с которыми они образуют гальваническую пару), и относительно не высокие прочностные характеристики этого материала значительно усложняют как саму конструкцию преобразователя, так и технологию его сборки.

При этом значительного улучшения свойств конечного продукта не достигается.

Тыльная (нерабочая) наклейка 4 выполнена из более тяжелого материала, не подверженного коррозии, например, из нержавеющей стали Х18Н9Т (плотность $\rho_4 = 7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_4 = 5,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) [12].

Материал болта 5 должен обеспечивать возможность получения необходимого напряжения армирования $\sigma_{ар} = 19,6 \pm 1 \text{ МПа}$, сохраняя при этом целостность всей конструкции. В качестве такого материала,

оптимального в плане соотношения ценовых и прочностных характеристик, может быть выбрана, например, сталь 40Х (плотность $\rho_5 = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_5 = 5,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}$).

Система уравнений, описывающих частотные свойства преобразователя такого типа, составлена на основе следующих предположений:

- а) тип преобразователя – составной стержневой;
- б) составляющие преобразователь элементы представляют собой отрезки упругих стержней с волновой толщиной менее четверти длины волны в материале стержня;
- в) преобразователь является полуволновым на резонансной частоте.

В механических системах такого типа при упругих колебаниях на резонансной частоте в нейтральном сечении 0-0 колебания отсутствуют, а на свободных торцах они имеют максимальную амплитуду.

Используя метод электромеханических аналогий, можно сопоставить отрезок стержня (как систему с рассредоточенными параметрами) с отрезком длинной линии (далее ДЛ) без потерь. Тогда эквивалентная электрическая схема ненагруженного (или нагруженного на воздух) на торцах стержневого преобразователя имеет вид, изображенный на рис. 3.

Для элементов, прилегающих к нейтральной плоскости 0-0, эквивалентные отрезки ДЛ считаются разомкнутыми на конце (колебаний нет – ток равен нулю). Для элементов, контактирующих с внешней средой (воздухом) эквивалентные отрезки ДЛ считаются замкнутыми. Входное сопротивление отрезков ДЛ в зависимости от их нагрузки на выходе определяется по следующим формулам [1; 13]:

– для короткозамкнутого на выходе отрезка ДЛ:

$$Z_{кз} = j \cdot z_i \cdot \text{tg}(k_i \cdot l_i); \quad (1)$$

– для разомкнутого на выходе отрезка ДЛ:

$$Z_p = -j \cdot z_i \cdot \text{ctg}(k_i \cdot l_i), \quad (2)$$

где $k_i = \frac{2\pi \cdot f}{c_i}$ – волновое число (фазовая постоянная) материала i -го конструктивного элемента преобразователя;

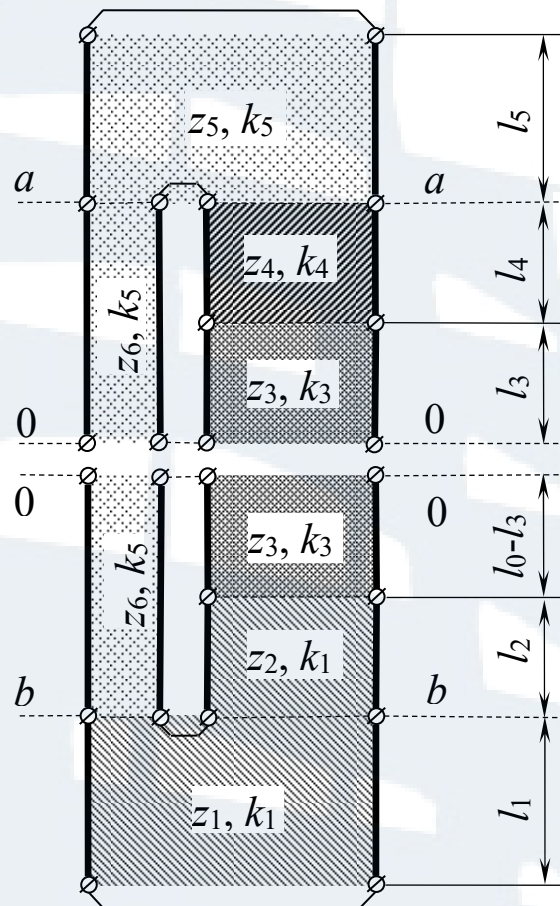


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема ненагруженного на торцах стержневого армированного преобразователя

$z_i = \rho_i \cdot c_i \cdot S_i$ – акустическое сопротивление i -го конструктивного элемента преобразователя.

При расчёте k_3 и z_3 использовать табличное значение скорости звука c_3^E в пьезоматериале выбранного типа.

При расчёте k_i и z_i остальных (неактивных) элементов конструкции использовать табличное значение скорости звука c_i в стержне из выбранного материала [12].

Если отрезок ДЛ нагружен на реактивное сопротивление z_H (или на отрезок ДЛ с отличающимися параметрами), то при расчете входного сопротивления такого отрезка эта нагрузка учитывается как дополнительный фазовый сдвиг:

$$Z_{\text{вх}i} = -j \cdot z_i \cdot \text{ctg}(k_i \cdot l_i + \Delta\varphi) \quad (3)$$

При этом считается, что этот дополнительный фазовый сдвиг формируется эквивалентным отрезком ДЛ с теми же параметрами, а именно:

$$z_i \cdot \text{ctg}(\Delta\varphi) = z_H \cdot \text{ctg}(k_H \cdot l_H), \text{ откуда}$$

$$\Delta\varphi = \text{arcctg} \left(\frac{z_H}{z_i} \cdot \text{ctg}(k_H \cdot l_H) \right). \quad (4)$$

С учетом того, что суммы сопротивлений отрезков ДЛ в сечениях $(a - a)$ и $(b - b)$ (смотри рис. 2 и рис. 3) на резонансе должны быть равны нулю, на основании формул (1-4) получим следующую систему частотных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{tg}(k_5 l_5) = \frac{z_6}{z_5} \cdot \text{ctg}[k_6(l_3 + l_4)] + \\ \quad + \frac{z_4}{z_5} \cdot \text{ctg} \left\{ k_4 l_4 + \text{arcctg} \left[\frac{z_3}{z_4} \cdot \text{ctg}(k_3 l_3) \right] \right\} \\ \text{tg}(k_1 l_1) = \frac{z_6}{z_1} \cdot \text{ctg}[k_6(l_2 + l_0 - l_3)] + \\ \quad + \frac{z_2}{z_1} \cdot \text{ctg} \left\{ k_2 l_2 + \text{arcctg} \left[\frac{z_3}{z_2} \cdot \text{ctg}(k_3(l_0 - l_3)) \right] \right\} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}$ – площадь излучающей поверхности рабочей накладки;

$S_2 = \frac{\pi \cdot (D_2^2 - d_6^2)}{4}$ – площадь поперечного сечения резьбовой части рабочей накладки;

$S_3 = \frac{\pi \cdot (D_3^2 - d_3^2)}{4}$ – площадь поперечного сечения пьезоэлемента;

$$S_4 = \frac{\pi \cdot (D_4^2 - d_4^2)}{4} \text{ – площадь поперечного сечения тыльной (нерабочей) накладки;}$$

$$S_5 = 0,6495 \cdot D_5^2 \text{ – площадь головки болта;}$$

$$S_6 = \frac{\pi \cdot d_6^2}{4} \text{ – площадь поперечного сечения стержня болта;}$$

$$l_0 = h \cdot n \text{ – высота пакета пьезоэлементов;}$$

$$L_n = l_1 + l_2 \text{ – общая высота рабочей накладки;}$$

$$L = l_0 + l_1 + l_2 + l_4 + l_5 \text{ – общая высота преобразователя.}$$

Остальные обозначения те же, что и в формулах (1, 2).

2.3.2. Расчет электроакустических характеристик

При расчете входных параметров электроакустического преобразователя (входного активного сопротивления и входной емкости) могут быть использованы различные схемы замещения [10; 12]. В дальнейших расчетах используется параллельная схема замещения на частоте механического резонанса, в которой сопротивления электрических и механических потерь и статическая емкость соединены, как показано на рис. 4.

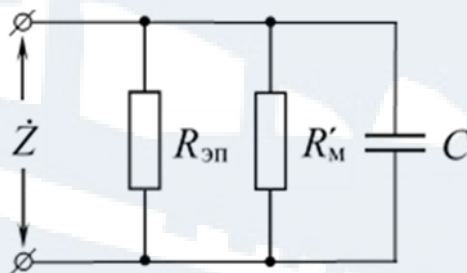


Рис. 4. Схема замещения электроакустического преобразователя на частоте механического резонанса

Ниже приводятся расчетные формулы для наиболее часто используемых электроакустических характеристик преобразователей рассматриваемого типа:

1) статическая ёмкость преобразователя:

$$C = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} \right) \cdot S_3 \cdot n \cdot \varepsilon_0}{h} ; \quad (6)$$

2) сопротивление электрических потерь:

$$R_{\text{эп}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C \cdot \text{tg} \delta} ; \quad (7)$$

3) активная составляющая механического сопротивления:

$$R'_M = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot S_0 \cdot h_0^2 \cdot A_H}{\zeta \cdot \left(Y_{33}^{\text{Ю}} \cdot d_{33} \cdot S_3 \right)^2 \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot \cos^2 \left(k_1 (l_1 + l_2) \right)} , \quad (8)$$

$$\text{где } A_H = \frac{2 \left\{ \text{tg} \left[k_3 (l_0 - l_3) \right] + \frac{z_4}{z_3} \cdot \text{tg} (k_4 l_4) \right\}}{2 \text{tg} (k_3 l_3) + \frac{z_1}{z_3} \cdot \left\{ \text{tg} \left[k_1 (l_1 + l_2) \right] + \text{tg} (k_4 l_4) \right\}} ; \quad (9)$$

4) ёмкостное сопротивление:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C} ; \quad (10)$$

5) полное активное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{эп}} \cdot R'_M}{R_{\text{эп}} + R'_M} ; \quad (11)$$

6) модуль полного сопротивления:

$$|Z| = \frac{R_{\text{ВХ}} \cdot X_c}{\sqrt{R_{\text{ВХ}}^2 + X_c^2}} ; \quad (12)$$

7) декремент затухания:

$$\nu = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot S_1}{f_p \cdot \eta_{\text{ам}} (M_{\text{Н1}} + A_{\text{Н1}} \cdot A_{\text{Н2}})} , \quad (13)$$

где $A_{\text{Н1}} = \cos^2(k_4 \cdot l_4) + \left(\frac{z_4}{z_3}\right)^2 \cdot \sin^2(k_4 \cdot l_4) ,$

$$A_{\text{Н2}} = M_3 + \frac{M_{\text{Н2}}}{\cos^2[k_1(l_1 + l_2)] + \left(\frac{z_1}{z_3}\right)^2 \cdot \sin^2[k_1(l_1 + l_2)]} ,$$

$$M_{\text{Н1}} = \rho_4 \cdot S_4 \cdot l_4 + \rho_5 \cdot S_5 \cdot l_5 + \rho_6 \cdot S_6 \cdot l_4 ,$$

$$M_{\text{Н2}} = \rho_1 \cdot S_1 \cdot l_1 + \rho_2 \cdot S_2 \cdot l_2 + \rho_6 \cdot S_6 \cdot l_2 ,$$

$$M_3 = \rho_3 \cdot S_3 \cdot l_0 ;$$

8) ширина частотной характеристики чувствительности на уровне -3 дБ (по давлению):

$$\Delta f = \frac{\nu \cdot f_p}{\pi} ; \quad (14)$$

9) время восстановления чувствительности:

$$\Delta \tau = \frac{3}{f_p \cdot \nu} ; \quad (15)$$

10) механическая добротность:

$$Q = \frac{\pi}{\nu}; \quad (16)$$

11) коэффициенты полезного действия (КПД):

– электромеханический

$$\eta_{\text{эм}} = \frac{R_{\text{эп}}}{R_{\text{эп}} + R'_{\text{м}}}; \quad (17)$$

– электроакустический

$$\eta_{\text{эа}} = \eta_{\text{эм}} \cdot \eta_{\text{ам}}; \quad (18)$$

12) чувствительность по напряжению в режиме излучения:

$$\gamma_{\text{изл}} = \frac{Y_{33}^{\text{Ю}} \cdot d_{33} \cdot S_3 \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot f_p \cdot g \cdot \cos[k_1(l_1 + l_2)]}{h \cdot c_0}; \quad (19)$$

13) напряжение возбуждения (эффективное значение):

$$U = \frac{S_1 \cdot h \cdot \sqrt{\rho_0 \cdot c_0 \cdot W_{\text{ак.уд}}}}{Y_{33}^{\text{Ю}} \cdot d_{33} \cdot S_3 \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot g \cdot \cos[k_1(l_1 + l_2)]} \cdot \frac{1}{A_{\text{н}}}; \quad (20)$$

14) потребляемый ток:

$$I = \frac{U}{|z|}; \quad (21)$$

15) потребляемая электрическая мощность:

$$W_{\text{эл}} = \frac{U^2}{R_{\text{вх}}}; \quad (22)$$

16) давление, развиваемое преобразователем на акустической оси на расстоянии 1 м (эффективное значение):

$$P_{1,м} = S_1 \cdot f_p \cdot \frac{1}{A_H} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{c_0}} \cdot W_{ак.уд} ; \quad (23)$$

17) чувствительность в режиме приёма:

$$\gamma_{пр} = \frac{\zeta \cdot Y_{33}^{Ю} \cdot d_{33} \cdot \eta_{ам} \cdot \cos[k_1 \cdot (l_1 + l_2)]}{\pi \cdot n \cdot f_p \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \rho_0 \cdot c_0 (1 - k_{33}^2)} \cdot \frac{1}{A_H} . \quad (24)$$

2.4. Расчёт клееных преобразователей с накладками

2.4.1. Расчет геометрических размеров

Характерной особенностью таких преобразователей является то, что в их составе отсутствуют силовые элементы (болты, винты, шпильки), стягивающие весь пакет. Целостность всей конструкции, ее прочностные свойства, а также стабильность электроакустических характеристик обеспечиваются только свойствами клеевых слоев между пьезоэлементом и частотопонижающими накладками.

Конструкция преобразователя и обозначения её элементов представлены на рис. 5.

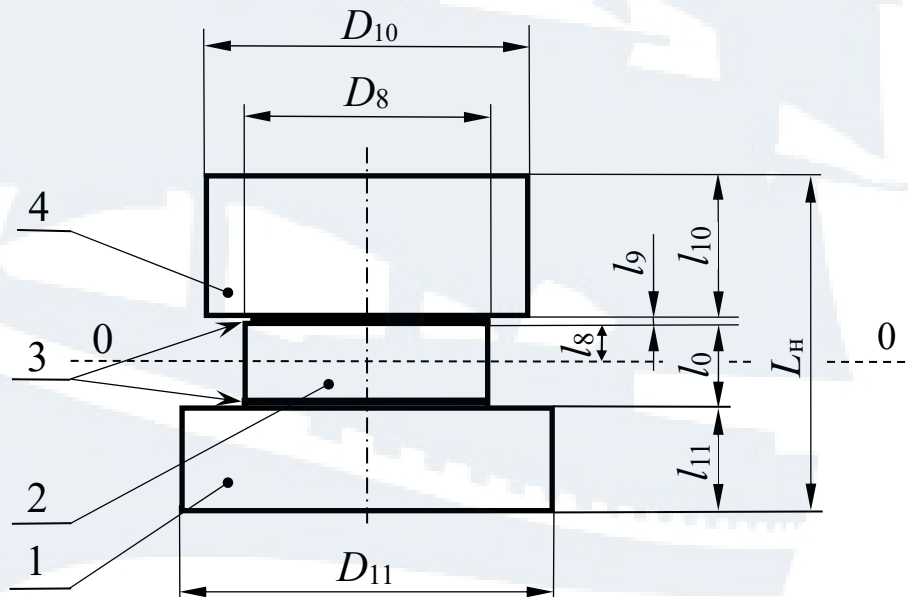


Рис. 5. Клееный электроакустический преобразователь с накладками: 1 – излучающая накладка; 2 – пьезоэлемент; 3 – клеевой шов; 4 – тыльная накладка; 00 – нейтральное сечение; aa, bb – расчётные сечения

При выборе материалов частотопонижающих накладок, а также состава клеевого слоя необходимо руководствоваться рекомендациями, изложенными при описании конструкции армированного преобразователя.

Для составления эквивалентной электрической схемы рассматриваемой конструкции преобразователя применен тот же метод электромеханических аналогий, который был использован при построении аналогичной схемы для преобразователя предварительно напряженной конструкции (см. подраздел 2.3). Полученная в результате схема представлена на рис. 6.

Соответствующая этой схеме система частотных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(k_{10} \cdot l_{10}) = \frac{z_9}{z_{10}} \cdot \operatorname{ctg} \left\{ k_9 \cdot l_9 + \operatorname{arcctg} \left[\frac{z_8}{z_9} \cdot \operatorname{ctg}(k_8 \cdot l_8) \right] \right\}, \\ \operatorname{tg}(k_{11} \cdot l_{11}) = \frac{z_9}{z_{11}} \cdot \operatorname{ctg} \left\{ k_9 \cdot l_9 + \operatorname{arcctg} \left[\frac{z_8}{z_9} \cdot \operatorname{ctg}(k_8 (l_0 - l_8)) \right] \right\}, \end{cases} \quad (25)$$

где $k_i = \frac{2\pi \cdot f}{c_i}$ – волновое число материала i -го конструктивного элемента преобразователя;

$z_i = \rho_i \cdot c_i \cdot S_i$ – акустическое сопротивление i -го конструктивного элемента преобразователя.

Примечание. При расчёте k_8 и z_8 используется табличное значение c_3^E скорости звука в пьезоматериале выбранного типа.

При расчёте k_i и z_i остальных (неактивных) элементов конструкции использовать табличное значение скорости звука c_i в стержне из выбранного материала [12].

$S_8 = \frac{\pi \cdot D_8^2}{4}$ – площадь поперечного сечения пьезоэлемента;

$S_9 = S_8$ – площадь клеевого шва;

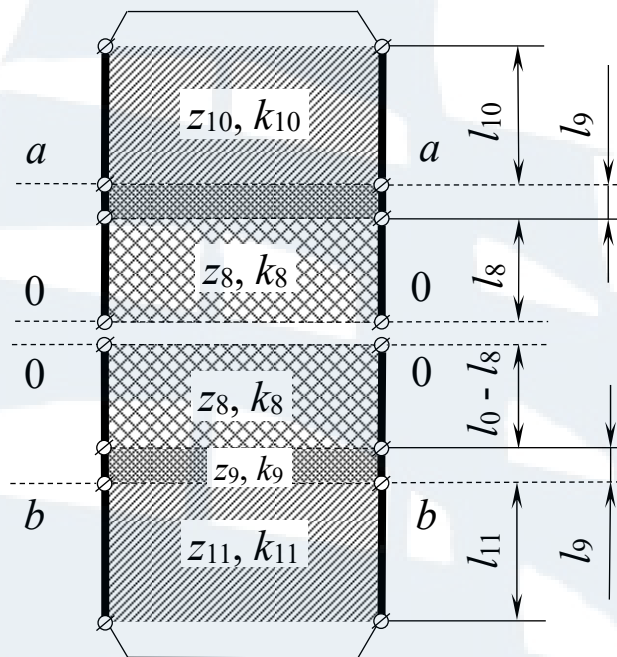


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема ненагруженного на торцах стержневого клееного преобразователя

$$S_{10} = \frac{\pi \cdot D_{10}^2}{4} \quad \text{— площадь поперечного сечения тыльной (нерабочей) накладки;}$$

$$S_{11} = \frac{\pi \cdot D_{11}^2}{4} \quad \text{— площадь излучающей поверхности рабочей накладки;}$$

$$l_0 = h \cdot n \quad \text{— высота пакета пьезоэлементов;}$$

$$L = l_0 + l_{10} + l_{11} + l_9 \cdot (n + 1) \quad \text{— общая высота преобразователя.}$$

2.4.2. Расчет электроакустических характеристик

При расчете входных параметров преобразователя (активного сопротивления и статической емкости) принимается параллельная схема замещения на частоте механического резонанса, представленная на рис. 4:

1) статическая ёмкость преобразователя:

$$C = \frac{\left(\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} \right) \cdot S_3 \cdot n \cdot \epsilon_0}{h} ; \quad (26)$$

2) сопротивление электрических потерь:

$$R_{\text{эп}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C \cdot \text{tg} \delta} ; \quad (27)$$

3) активная составляющая механического сопротивления:

$$R'_M = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot S_{11} \cdot h^2 \cdot A_{\text{HK}}}{\zeta \cdot (Y_{33}^{\text{Ю}} \cdot d_{33} \cdot S_3)^2 \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot \cos^2[k_{11} \cdot l_{11}]} , \quad (28)$$

$$\text{где } A_{\text{HK}} = \frac{2 \left\{ \text{tg}[k_8 \cdot f_p \cdot (l_0 - l_8)] + \frac{z_{10}}{z_8} \cdot \text{tg}(k_{10} \cdot f_p \cdot l_{10}) \right\}}{2 \text{tg}(k_8 \cdot f_p \cdot l_8) + \frac{z_{11}}{z_8} \cdot \left\{ \text{tg}[k_{11} \cdot f_p \cdot l_{11}] + \text{tg}(k_{10} \cdot f_p \cdot l_{10}) \right\}} ; \quad (29)$$

4) ёмкостное сопротивление X_c , полное активное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и модуль полного сопротивления $|Z|$ определяются по формулам (10-12).

5) декремент затухания:

$$\nu = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot S_{11}}{f_p \cdot \eta_{\text{ам}} (M_{\text{к1}} + A_{\text{к1}} \cdot A_{\text{к2}})} , \quad (30)$$

$$\text{где } A_{\text{к1}} = \cos^2(k_{10} \cdot l_{10}) + \left(\frac{z_{10}}{z_8} \right)^2 \cdot \sin^2(k_{10} \cdot l_{10}) ,$$

$$A_{к2} = M_{к3} + \frac{M_{к2}}{\cos^2(k_{11} \cdot l_{11}) + \left(\frac{z_{11}}{z_8}\right)^2 \cdot \sin^2(k_{11} \cdot l_{11})},$$

$$M_{к1} = \rho_{11} \cdot S_{11} \cdot l_{11},$$

$$M_{к2} = \rho_{10} \cdot S_{10} \cdot l_{10},$$

$$M_{к3} = \rho_8 \cdot S_8 \cdot l_8.$$

6) ширина частотной характеристики чувствительности Δf на уровне -3 дБ (по давлению), время восстановления чувствительности τ , механическая добротность Q , электромеханический $\eta_{эм}$ и электроакустический $\eta_{эа}$ коэффициенты полезного действия вычисляются по формулам (17-18);

7) чувствительность по напряжению в режиме излучения:

$$\gamma_{изл} = \frac{Y_{33}^{Ю} \cdot d_{33} \cdot S_8 \cdot \eta_{ам} \cdot f_p \cdot g \cdot \cos(k_{11} \cdot l_{11})}{h \cdot c_0}; \quad (31)$$

8) напряжение возбуждения (эффективное значение):

$$U = \frac{S_{11} \cdot h \sqrt{\rho_0 \cdot c_0 \cdot W_{ay}}}{Y_{33}^{Ю} \cdot d_{33} \cdot S_8 \cdot \eta_{ам} \cdot g \cdot \cos(k_{11} \cdot l_{11})} \cdot \frac{1}{A_{нк}}; \quad (32)$$

9) потребляемый ток I и электрическая мощность $W_{эл}$ вычисляются по формулам (21-22);

10) давление, развиваемое преобразователем на акустической оси на расстоянии 1 м (эффективное значение):

$$P_{1,м} = S_{11} \cdot f_p \cdot \frac{1}{A_{нк}} \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot W_{ay}}{c_0}}; \quad (33)$$

11) чувствительность в режиме приёма:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\alpha \cdot Y_{33}^{10} \cdot d_{33} \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot \cos(k_{11} \cdot l_{11})}{\pi \cdot n \cdot f_p \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \rho_0 \cdot c_0 (1 - k_{33}^2)} \cdot \frac{1}{A_{\text{нк}}}, \quad (34)$$

где $\alpha = 4$ (односторонняя нагрузка на среду).

2.5. Расчёт преобразователей без накладок

2.5.1. Расчет геометрических размеров

По сути, такой преобразователь является отдельным пьезоэлементом необходимых размеров, выбор которых обусловлен требованиями, изложенными в разделе 2.2.

Конструкция и обозначения элементов такого преобразователя представлены на рис. 7.

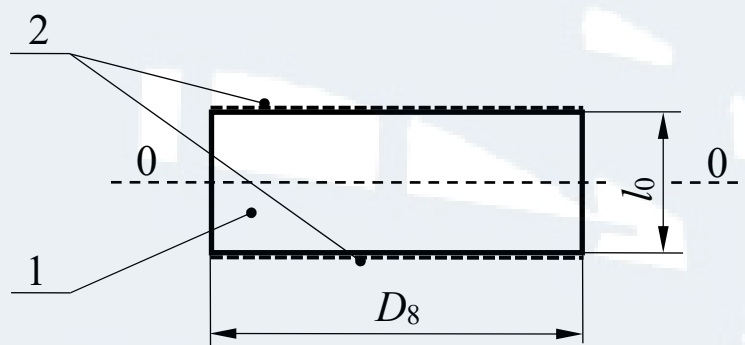


Рис. 7. Электроакустический преобразователь без накладок:
1 – пьезоэлемент; 2 – электроды (напыление серебром);
00 – нейтральное сечение

Ниже представлены частотные уравнения для колебаний на продольном (толщинном) резонансе, соответствующие различным типам пьезоэффекта (продольного и поперечного) [12]:

– при поперечном пьезоэффекте

$$l_0 = \frac{c_1^E}{2 \cdot f_p}; \quad (35)$$

– при продольном пьезоэффекте

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot f_p \cdot l_0}{c_3^D}\right) = \frac{\pi \cdot f_p \cdot l_0}{k_{33}^2 \cdot c_3^D} \quad (36)$$

2.5.2. Расчет электроакустических характеристик

При расчете входных параметров преобразователя (активного сопротивления и статической емкости) принимается параллельная схема замещения на частоте механического резонанса, представленная на рис. 4:

1) статическая ёмкость преобразователя

$$C = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0}\right) \cdot S_0 \cdot \varepsilon_0}{l_0}; \quad (37)$$

2) сопротивление электрических потерь $R_{\text{эл}}$ определяется по формуле (7);

3) активная составляющая механического сопротивления определяется по представленным ниже формулам:

– при продольном пьезоэффекте:

$$R'_M = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot l_0^2}{\zeta \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot S_0 \left(Y_{33}^{\text{Ю}} \cdot d_{33}\right)^2}; \quad (38)$$

– при поперечном пьезоэффекте:

$$R'_M = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot l_0^2}{\zeta \cdot \eta_{\text{ам}} \cdot S_0 \left(Y_{31}^{\text{Ю}} \cdot d_{31}\right)^2}; \quad (39)$$

4) емкостное сопротивление X_c , полное активное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и модуль полного сопротивления $|Z|$ определяются по формулам (10-12);

5) декремент затухания:

$$\nu = \frac{\rho_0 \cdot c_0}{f_p \cdot \eta_{ам} \cdot \rho_3 \cdot l_0} ; \quad (40)$$

б) ширина частотной характеристики чувствительности Δf , время восстановления чувствительности τ , механическая добротность Q , электромеханический $\eta_{эм}$ и электроакустический $\eta_{эа}$ КПД вычисляются по формулам (14-18).

7) чувствительность по напряжению в режиме излучения вычисляется по формулам:

– при продольном пьезоэффекте:

$$\gamma_{изл} = \frac{Y_{33}^{Ю} \cdot d_{33} \cdot S_0 \cdot \eta_{ам} \cdot f_p \cdot g}{l_0 \cdot c_0} ; \quad (41)$$

– при поперечном пьезоэффекте:

$$\gamma_{изл} = \frac{Y_{31}^{Ю} \cdot d_{31} \cdot S_0 \cdot \eta_{ам} \cdot f_p \cdot g}{l_0 \cdot c_0} ; \quad (42)$$

8) давление, развиваемое преобразователем на акустической оси на расстоянии 1 м (эффективное значение):

$$P_{1м} = S_0 \cdot f_p \sqrt{\frac{\rho_0}{c_0} \cdot W_{ау}} ; \quad (43)$$

9) чувствительность в режиме приёма:

– при продольном пьезоэффекте:

$$\gamma_{пр} = \frac{\alpha \cdot Y_{33}^{Ю} \cdot d_{33} \cdot \eta_{ам} \cdot S_0}{2\pi \cdot f_p \cdot l_0 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot C(1-k_{33}^2)} ; \quad (44)$$

– при поперечном пьезоэффекте:

$$\gamma_{пр} = \frac{\alpha \cdot Y_{31}^{Ю} \cdot d_{31} \cdot \eta_{ам} \cdot S_0}{2\pi \cdot f_p \cdot l_0 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot C(1-k_{31}^2)} . \quad (45)$$

3. Расчет энергетических параметров гидроакустического канала

3.1. Условные обозначения

В табл. 2 приведены обозначения и размерности всех параметров, входящих в формулы данного раздела.

Таблица 2

Условные обозначения параметров

<i>Обозначение параметра</i>	<i>Наименование параметра</i>	<i>Размерность</i>
a, b	Размеры (длина и ширина) рабочей поверхности преобразователя	м
A_0, B_0	Коэффициент амплитудного распределения нулевого элемента	
A_i, B_i	Коэффициент амплитудного распределения i -го элемента	
A_m	Коэффициент амплитудного распределения m -го элемента	
B_{mn}	Коэффициент амплитудно-фазового распределения (комплексное число)	
c_0	Скорость звука в воде	м/с
d	Диаметр рабочей поверхности преобразователя	м
D	Вероятность правильного обнаружения	
D_p	Диаметр рабочей поверхности антенны	м
F	Вероятность ложной тревоги	
f	Рабочая частота	Гц
Δf	Ширина полосы пропускания приёмного тракта	Гц
G	Коэффициент разориентации	
g	Коэффициент прохождения через обтекатель (или экран) по давлению	
g_a	Коэффициент, зависящий от направленности излучающей и приемной антенн	
h	Глубина погружения антенны	м
i	Порядковый номер элемента в антенне	
j	Мнимая единица	

<i>Обозначение параметра</i>	<i>Наименование параметра</i>	<i>Размерность</i>
$J_0(x), J_1(x), J_{mn}(x)$	Функции Бесселя (цилиндрические) первого рода 0-го, 1-го и m -го порядка соответственно	
k	Волновое число	1/м
i	Порядковый номер элемента в антенне	
l	Межцентровое расстояние между соседними элементами в антенне	м
L	Межцентровое расстояние между группами	м
a, b	Размеры (длина и ширина) прямоугольной антенны	м
M_i	Число элементов, расположенных на i -й окружности	
n_1, n_2	Число элементов в 1-й и 2-й группах	
N	Число элементов (преобразователей) в антенне	
$P_{ш}$	Звуковое давление помех	Па
P_0	Пороговое значение эхосигнала (по давлению)	Па
$P_{ш0}$	Звуковое давление помех, приведённое к стандартным условиям (частота 1 кГц, полоса 1 Гц)	Па/Гц ^{1/2}
$P_{1м}$	Амплитуда звукового давления на акустической оси антенны, приведённая к расстоянию 1 м	Па
$q(\theta)$	Весовая функция	
$\frac{1}{Q}$	Уровень побочных максимумов характеристики направленности	
r_c, r, r_p, r_p	Дистанция связи, локации грунта, нижней подборы трала, рыбы (косяка или одиночной)	м
$r_{км}$	Дистанция локации сосредоточенной цели (косяка или одиночной рыбы), выраженная в км	км
r_d	Радиус дуги	м
$r_{ки}$	Радиус i -го кольца	м

Обозначение параметра	Наименование параметра	Размерность
$r_{мз}$	Протяженность мертвой зоны	м
Δr	Разрешающая способность по дальности	м
$r_{км}$	Дистанция локации сосредоточенной цели (косяка или одиночной рыбы), выраженная в км	км
$R_э$	Радиус эквивалентной сферы цели	м
$R_{п}$	Радиус нижней (или верхней) подборы трала	м
$R_{к}$	Радиус наружного кольца	м
$R(\theta)$	Характеристика направленности антенны	
$R_0(\theta)$	Заданная для синтеза характеристика направленности антенны	
$R_1(\theta)$	Нормированная характеристика направленности одного элемента антенны	
$R_m(\theta)$	Нормированная характеристика направленности m -го элемента антенны	
S	Площадь рабочей поверхности антенны	м ²
S_1	Площадь рабочей поверхности преобразователя	м ²
W	Акустическая мощность	Вт
W_{ay}	Удельная акустическая мощность	Вт/м ²
α_c	Угол скольжения падающего луча	градус
α	Угол раскрыва дуговой антенны	градус
γ	Коэффициент осевой концентрации антенны	
δ	Коэффициент распознавания сигнала	
η	Коэффициент заполнения рабочей поверхности антенны преобразователями	
θ, φ	Текущий угол в соответствующих координатных плоскостях	градус
θ_n, θ_m	Угловое положение n -го и m -го элементов дискретной дуговой антенны	градус
$\theta_{к}$	Угол компенсации	градус
$\theta_{км}$	Максимальный угол компенсации	градус

<i>Обозначение параметра</i>	<i>Наименование параметра</i>	<i>Размерность</i>
$2\theta_0$	Ширина основного лепестка характеристики направленности на нулевом уровне	градус
$2\theta_{0,7}$	Ширина основного лепестка характеристики направленности на уровне 0,7 по давлению	градус
$2\theta_1, 2\theta_2$	Ширина основного лепестка характеристики направленности на уровне 0,7 по давлению во взаимно перпендикулярных плоскостях xOz и yOz соответственно	градус
λ_0	Длина волны в воде	м
$\mu, \mu_{\text{п}}$	Коэффициент отражения (по давлению) от грунта и нижней подборы трала соответственно	
ν	Колебательная скорость в акустической волне	м/с
ρ_0	Плотность воды	кг/м ³
τ	Длительность излучаемого импульса	с
ψ	Значение угловой координаты, при которой $R_0(\theta)$ принимает максимальное значение	градус

3.2. Предварительный расчет параметров антенны

Для выбора конструкции активных элементов антенны (электроакустических преобразователей), а также конструкции антенны в целом, необходимо провести предварительные (оценочные) расчеты указанных ниже параметров.

Габаритные размеры рабочей (излучающей) поверхности антенны определяются по формулам (63, 64) с учетом рабочей частоты и заданной ширины характеристики направленности. При этом рабочая частота может быть либо заданной в техническом задании, либо рассчитанной как оптимальная по формуле (46).

Форма рабочей поверхности в этом случае определяется из следующих соображений:

- если ширина характеристики направленности задана одним значением угла, то форма рабочей поверхности может быть круглой диаметром d или квадратной с размером стороны a ;
- если ширина характеристики направленности задана двумя значениями угла, то форма рабочей поверхности чаще всего выбирается прямоугольной со сторонами a и b .

Коэффициент осевой концентрации приближенно оценивается по формуле (56). При этом коэффициент заполнения принимается равным величине $\eta = 0,7$ для дискретных антенн, состоящих из нескольких автономных преобразователей. Для сплошных антенн, состоящих из одного преобразователя, либо из нескольких, имеющих общую рабочую частотопонижающую накладку, принимается равным $\eta = 1$.

3.3. Расчет необходимой акустической мощности

Как было упомянуто в разделе 2, при заданной дистанции локации целей больших волновых размеров (в этом случае сила цели не зависит от частоты), оптимальная рабочая частота определяется по следующей формуле [4]:

$$f_p = f_{\text{опт}} \approx \frac{39}{r_{\text{км}}^{2/3}}. \quad (46)$$

Акустическая мощность, которую должна излучать гидроакустическая антенна прибора, чтобы обеспечить заданные дальности обнаружения целей, зависит от целого ряда факторов: режима работы канала (связь или активная локация целей), уровня помех в точке приема сигнала, направленных свойств антенны [5].

При расчете акустической мощности, необходимой для обеспечения заданных параметров акустического канала прибора, используются следующие формулы [13]:

– в режиме связи (*режим излучения сигнала*):

$$W_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot P_0^2}{\gamma \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot G^2 \cdot g^2} \cdot 10^{10^{-4} \cdot \beta \cdot r_c}; \quad (47)$$

– в режиме локации грунта или поверхности моря (*режим излучения и приема отраженного сигнала*):

$$W_r = \frac{8 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot P_0^2}{\mu^2 \cdot \gamma \cdot \rho_0 \cdot c_0^2 \cdot \tau \cdot g_a \cdot g^4} \cdot 10^{2 \cdot 10^{-4} \cdot \beta \cdot r}; \quad (48)$$

– в режиме локации нижней или верхней подборы трала:

$$W_{\Pi} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r_{\Pi}^3 \cdot P_0^2}{\gamma \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot \tau \cdot \mu_{\Pi}^2 \cdot R_{\Pi} \cdot g_a \cdot g^4 \cdot \tan \theta_{0,7}} \cdot 10^{2 \cdot 10^{-4} \cdot \beta \cdot r_{\Pi}} ; \quad (49)$$

– в режиме локации сосредоточенной цели (плотного косяка, одиночной рыбы):

$$W_p = \frac{16 \cdot \pi \cdot r_p^4 \cdot P_0^2}{\gamma \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot R_g^2 \cdot g^4} \cdot 10^{2 \cdot 10^{-4} \cdot \beta \cdot r_p} . \quad (50)$$

Если в режиме излучения и приема используется одна и та же антенна, то в формулах (48) и (49) коэффициент g_a принимает значение $g_a = 0,7$.

Заданием на разработку прибора может быть определено несколько целей, подлежащих обнаружению, причем для каждой цели может быть задана своя дистанция локации. В этом случае для каждой цели рассчитывается свое значение необходимой мощности и для дальнейших расчетов принимается наибольшее из полученных значений.

Чтобы использовать для расчетов формулы (47-50), необходимо определить входящие в них величины P_0 , β , γ , τ , μ и R_g .

При работе гидроакустического прибора в условиях шумовой помехи (характерный режим для бортовой аппаратуры) пороговое значение акустического давления сигнала P_0 на входе приемной антенны (или совмещенной антенны в режиме приема) должно превышать уровень шумовой помехи $P_{\text{ш}}$ на величину коэффициента распознавания δ [3; 4; 5; 6], а именно:

$$P_0 = \delta \cdot P_{\text{ш}} . \quad (51)$$

Если шумовая помеха не зависит от частоты (белый шум), то $P_{\text{ш}} = \text{const}$ и $P_0 = \text{const}$.

Если шумовая помеха частотозависима, то $P_{\text{ш}}$ определяется по формуле (52), а затем P_0 вычисляется по формуле (51) [12].

$$P_{\text{ш}} = 10^3 \cdot \frac{P_{\text{ш}0}}{f_p} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f}{\gamma}} . \quad (52)$$

Приведенное значение шумовой помехи $P_{\text{ш}0}$ зависит от типа судна-носителя и имеет следующие значения [14]:

- для малотоннажных судов $P_{\text{ш}0} = 0,1 \text{ Па/Гц}^{1/2}$;
- для среднетоннажных судов $P_{\text{ш}0} = 0,2 \text{ Па/Гц}^{1/2}$;
- для крупнотоннажных судов $P_{\text{ш}0} = 0,3 \text{ Па/Гц}^{1/2}$.

Для буксируемых и установленных на трале приборов характерен режим работы в условиях низкого уровня шумовой помехи, когда уровень шумов $U_{\text{ш}}$ на входе приемного тракта прибора ниже его чувствительности U_{min} . В этом случае пороговое значение акустического давления сигнала P_0 на входе приемной антенны определяется значением $\delta \cdot U_{\text{min}}$ и чувствительностью антенны в режиме приема $\gamma_{\text{пр}}$, а именно:

$$P_0 = \frac{\delta \cdot U_{\text{min}}}{\gamma_{\text{пр}}} . \quad (53)$$

Коэффициент распознавания δ (по давлению) вычисляется по заданным вероятностным параметрам обнаружения [4; 8]. При заданных значениях вероятности правильного обнаружения D и вероятности ложной тревоги F коэффициент распознавания определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\ln F}{\ln D} - 1} . \quad (54)$$

Если параметрам обнаружения не заданы, то значение коэффициента распознавания выбирается из диапазона $\delta = 1,5 \div 3$.

Коэффициент километрического затухания звука в морской воде зависит от частоты и определяется по следующим формулам:

$$\beta = 0,036 \cdot (10^{-3} \cdot f_p)^{\frac{3}{2}}, \quad \text{при } f_p \leq 60 \text{ кГц} . \quad (55)$$

$$\beta = \frac{f_p^2 (44,45 + 2,96 \cdot 10^{-10} \cdot f_p^2)}{4,45 \cdot 10^9 + f_p^2}, \quad \text{при } f_p > 60 \text{ кГц.} \quad (56)$$

Коэффициент осевой концентрации антенны зависит от формы антенны и вычисляется по представленным ниже формулам:

а) для плоской антенны произвольной формы:

$$\gamma = \eta \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{\lambda_0^2} = \eta \frac{4 \cdot \pi \cdot f_p^2 \cdot S}{c_0^2}; \quad (57)$$

б) для плоской дискретной антенны из N преобразователей с площадью излучающей накладки S_1 (произвольной формы):

$$\gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_p^2 \cdot S_1 \cdot N}{c_0^2}; \quad (58)$$

в) для плоской дискретной линейной антенны из N круглых преобразователей:

– при заданной ширине характеристики направленности одного преобразователя многоэлементной антенны:

$$\gamma = \frac{2,6244 \cdot N}{\sin^2 \theta_{0,7}}; \quad (59)$$

– при заданном диаметре рабочей поверхности одного преобразователя многоэлементной антенны:

$$\gamma = \frac{(\pi \cdot d \cdot f_p)^2 \cdot N}{c_0^2}; \quad (60)$$

г) для плоской дискретной линейной антенны из N преобразователей прямоугольной формы:

– при заданной ширине характеристики направленности одного преобразователя многоэлементной антенны:

$$\gamma = \frac{2,4955 \cdot N}{\sin\theta_T \cdot \sin\theta_B} ; \quad (61)$$

– при заданных длине a и ширине b рабочей поверхности одного преобразователя многоэлементной антенны:

$$\gamma = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot f_p^2 \cdot N}{c_0^2} . \quad (62)$$

Примечание. Если антенна не является мозаичной, т. е. состоит из одного преобразователя, в формулах (57-62) необходимо положить $N = 1$;

д) для антенны из N преобразователей прямоугольной формы, образующих цилиндрическую поверхность (см. рис. 8, е):

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot f_p}{\alpha \cdot c_0} . \quad (63)$$

Габариты рабочей поверхности антенны (ее апертура) зависят от ее конфигурации, заданной ширины характеристики направленности 2θ и рабочей частоты f_p . Эта зависимость описывается следующими формулами:

– для круглой антенны диаметром D_p :

$$D_p = \frac{1,62 \cdot c_0}{\pi \cdot f_p \cdot \sin\theta_{0,7}} ; \quad (64)$$

– для прямоугольной, квадратной и линейной антенн с соответствующим линейным размером a :

$$a = \frac{1,44 \cdot c_0}{\pi \cdot f_p \cdot \sin\theta_{0,7}} . \quad (65)$$

Площадь излучающей поверхности антенны S вычисляется по следующим формулам:

– для мозаичной антенны произвольной формы, составленной из N круглых преобразователей:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot N}{4} ; \quad (66)$$

– для мозаичной антенны произвольной формы, составленной из N прямоугольных преобразователей со сторонами a и b :

$$S = a \cdot b \cdot N . \quad (67)$$

Примечание. Если антенна не является мозаичной, то есть состоит из одного преобразователя, в формулах (66-67) необходимо принять $N = 1$.

Длительность излучаемого импульса τ определяется допустимой величиной мертвой зоны $r_{\text{мз}}$ и разрешающей способностью по дальности прибора Δr .

Кроме длительности импульса τ протяженность мертвой зоны $r_{\text{мз}}$ определяет время восстановления чувствительности антенны Δt . Последнее зависит от скорости затухания переходных процессов в антенне и оценивается, как правило, величиной трех постоянных времени затухания. Учитывая все факторы, протяженность мертвой зоны определяется следующей зависимостью:

$$r_{\text{мз}} = c_0 (\tau + \Delta t) . \quad (68)$$

Зависимость разрешающей способности по дальности Δr от длительности зондирующего импульса τ определяется формулой:

$$\Delta r = \frac{c_0 \cdot \tau}{2} . \quad (69)$$

Коэффициент отражения μ от лоцируемой поверхности зависит как от ее структуры (состава, характера неровностей), так и от угла скольжения α_c падающего луча (наименьшего угла между поверхностью и границей раскрыва характеристики направленности). В табл. 3 представлены значения коэффициента отражения от объектов, которые обычно используются при расчетах акустических каналов гидроакустических рыбопромысловых приборов.

При расчетах акустических каналов рыбопромысловых приборов принято использовать следующие значения радиусов эквивалентных сфер целей промысловых объектов:

- для сосредоточенных рыбных скоплений $R_s = 2$ м;
- для одиночных крупных рыб размером 70-80 см эта величина принимается равной $R_s = 0,1$ м.

После расчета величины акустической мощности необходимо проверить полученный результат на отсутствие кавитации.

Таблица 3

Коэффициенты отражения от объектов локации

<i>Объект локации</i>	<i>Коэффициент отражения, μ</i>	
	<i>Нормальное падение, $\alpha_c = 90^\circ$</i>	<i>Наклонное падение, $\alpha_c = 60^\circ$</i>
Поверхность моря (при волнении до 5 баллов)	0,7 ÷ 0,9	–
Донная поверхность в зависимости от ее состава: – скальный грунт; – ил – песок	0,8 0,3	0,1 0,03

Акустическая кавитация – это явление, которое возникает при излучении в жидкость звука, амплитуда звукового давления которого превосходит некоторую пороговую величину [11]. Во время полупериодов разрежения возникают кавитационные пузырьки на так называемых кавитационных зародышах, которыми чаще всего являются газовые включения, содержащиеся в жидкости и на колеблющейся поверхности акустического излучателя.

Поэтому кавитационный порог повышается по мере снижения содержания газа в жидкости, при увеличении гидростатического давления, а кроме того, при увеличении частоты звука и при сокращении продолжительности озвучивания.

Кавитационные пузырьки, захлопываясь во время полупериодов сжатия, создают кратковременные (порядка 10^{-6} сек) импульсы давления (до 10^3 Мн/м² и более), способные разрушить даже весьма прочные материалы. Такое разрушение наблюдается на поверхности мощных акустических излучателей, работающих в жидкости. Давление при захлопывании кавитационных пузырьков повышается при снижении частоты звука и при повышении гидростатического давления. Оно выше в жидкостях с малым давлением насыщенного пара.

По изложенным выше причинам удельное значение излучаемой мощности W_{ay} не должно быть больше кавитационного порога $W_{ук}$. В этой связи условие отсутствия кавитации можно записать в следующем виде:

$$W_{ay} \leq W_{ук}, \quad (70)$$

где $W_y = \frac{W}{S}$ – удельная акустическая мощность.

При $W_{ay} \geq W_{ук}$ дается диагностическое предупреждение о превышении порога кавитации.

Зависимость порога кавитации $W_{ук0}$ у поверхности от длительности излучаемого импульса τ приведена в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость порога кавитации от длительности излучаемого импульса

<i>Длительность импульса $\tau, с$</i>	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$	$>10^{-1}$
<i>$W_{ук0}, Вт/м^2$</i>	$15 \cdot 10^4$	10^5	$7 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$

Зависимость порога кавитации $W_{ук}$ от глубины погружения антенны h определяется по формуле:

$$W_{ук} = W_{ук0} (1 + 0,1 \cdot h)^2. \quad (71)$$

Амплитуда звукового давления, создаваемого антенной на акустической оси, приведенная к расстоянию 1 м, вычисляется по формуле:

$$P_{1м} = \sqrt{\frac{W \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot \gamma}{2\pi}}. \quad (72)$$

В некоторых отечественных и зарубежных источниках параметры акустических каналов рассчитываются, исходя из уравнения гидролокации, записанного в относительных единицах – децибелах (далее дБ). Такая форма записи имеет свои плюсы и минусы, которые здесь затрагивать нет смысла. Просто представим расчетные формулы

(47-50) в относительных единицах на основании методики, изложенной в [4].

Согласно принятым обозначениям представим уравнение гидролокации (50) для сосредоточенной цели в следующем виде:

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT, \quad (73)$$

где $SL = 10 \cdot \lg W + 10 \cdot \lg \gamma + 170,77$ дБ – уровень излучения;

$2TL = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot r + 40 \cdot \lg r$ – уровень потерь при распространении (расстояние r в метрах);

$TS = 20 \cdot \lg R_s/2$ – сила цели;

$NL = 20 \cdot \lg P_{ш0} + 10 \cdot \lg \Delta f - 20 \cdot \lg f_p + 180$ дБ – относительный уровень шума (f_p и Δf в Гц);

$DI = 10 \cdot \lg \gamma$ – индекс направленности антенны;

$DT = 20 \cdot \lg \delta$ – коэффициент распознавания.

Решение уравнения (73) относительно излучаемой мощности, необходимой для локации сосредоточенной цели, имеет вид:

$$10 \cdot \lg W_p = 40 \cdot \lg r_r + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot r_p + 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{ш0} + 10 \cdot \lg \Delta f - \\ - 20 \cdot \lg f_p - 20 \cdot \lg \gamma - 20 \cdot \lg R_s/2 - 40 \cdot \lg g + 9,23 \text{ дБ} . \quad (74)$$

Аналогично получают уравнения для режима связи (75), локации грунта (76) и подборы трала (77) (без вывода):

$$10 \cdot \lg W_c = 20 \cdot \lg r_p + 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{ш0} + 10 \cdot \lg \Delta f - 20 \cdot \lg f_p - \\ - 20 \cdot \lg \gamma + 10^{-3} \cdot \beta \cdot r_p - 20 \cdot \lg G - 20 \cdot \lg g + 9,23 \text{ дБ} . \quad (75)$$

$$10 \cdot \lg W_r = 30 \cdot \lg r_r + 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{ш0} + 10 \cdot \lg \Delta f - 20 \cdot \lg f_p - \\ - 20 \cdot \lg \gamma + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot r_r - 20 \cdot \lg \mu - 10 \cdot \lg c_0 - 10 \cdot \lg \tau - \\ - 10 \cdot \lg g_a - 20 \cdot \lg g - 16,5 \text{ дБ} . \quad (76)$$

$$\begin{aligned}
10 \cdot \lg W_{\Pi} = & 30 \cdot \lg r_{\Gamma} + 20 \cdot \lg \delta + 20 \cdot \lg P_{\text{ш0}} + 10 \cdot \lg \Delta f - 20 \cdot \lg f_p - \\
& - 20 \cdot \lg \gamma + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot r_{\Gamma} - 20 \cdot \lg \mu_{\Pi} - 10 \cdot \lg R_{\Pi} - 10 \cdot \lg \tau - \\
& - 40 \cdot \lg g - 10 \cdot \lg (\tan \theta_{0,7}) + 14,2 \text{ дБ} .
\end{aligned}
\tag{77}$$

4. Расчет характеристик направленности антенн

Расчет характеристик направленности антенн заданной формы при заданных законах размещения источников по их поверхности и амплитудно-фазового распределения возбуждения этих источников относится к прямым задачам анализа таких устройств.

В данном разделе приведен расчет характеристик направленности интерференционных антенн с различной конфигурацией излучающих поверхностей (см. рис. 8), лежащих в плоском жёстком экране.

При выводе представленных в этом разделе формул использовались следующие теоремы [12]:

Теорема умножения. Характеристика направленности антенны, состоящей из одинаковых элементов, одинаково ориентированных в пространстве и имеющих одинаковые характеристики направленности, равна произведению характеристик направленности одного элемента и гипотетической антенны, состоящей из ненаправленных элементов, расположенных в центрах реальных и имеющих такое же амплитудно-фазовое распределение, что и реальные элементы.

Теорема смещения. Характеристика направленности антенны в некоторой плоскости L совпадает с характеристикой направленности антенны, являющейся проекцией рассматриваемой антенны на плоскость L .

Теорема сложения. Давление, развиваемое антенной, имеющей распределение колебательной скорости $F(s)$, равно сумме давлений, развиваемых такими же антеннами с распределениями $A(s)$ и $B(s)$, если $F(s) = A(s) + B(s)$.

Далее представлены формулы для расчета характеристик направленности антенн с рабочей поверхностью различной формы и структуры.

В первом подразделе рассмотрены антенны, имеющие сплошную плоскую рабочую поверхность (так называемые непрерывные антенны) различных форм, чаще всего встречающихся при проектировании.

4.1. Плоские непрерывные антенны

Характеристики направленности плоских непрерывных антенн в зависимости от формы их излучающей поверхности (рис. 8, б, в, г) рассчитывается по следующим формулам [9]:

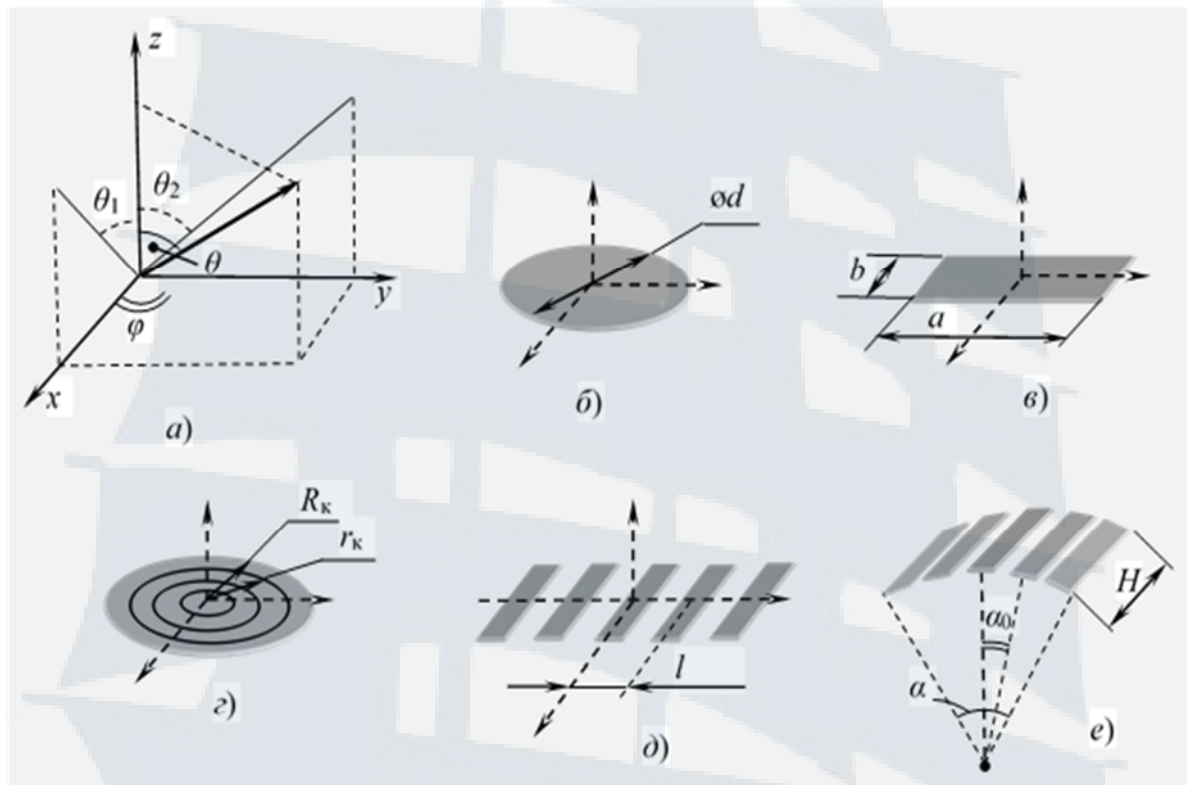


Рис. 8. Формы и структура излучающих поверхностей гидроакустических антенн: а) принятая при расчетах система координат; б) круглая антенна; в) прямоугольная антенна; г) дискретная кольцевая антенна; д) дискретная прямоугольная (или линейная) антенна; е) секторно – цилиндрическая дискретная антенна

– прямоугольная антенна с размером a в рассматриваемой плоскости (рис. 8, в):

$$R_1(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot a}{\lambda_0} \sin\theta\right)}{\frac{\pi \cdot a}{\lambda_0} \sin\theta}; \quad (78)$$

– круглая антенна диаметром d (рис. 8, б):

$$R_1(\theta) = \frac{2 \cdot J_1\left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda_0} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{\pi \cdot d}{\lambda_0} \cdot \sin\theta}; \quad (79)$$

– круглая антенна в виде плоского кольца (рис. 8, в):

$$R_1(\theta) = \frac{R_K^2}{R_K^2 - r_K^2} \cdot \frac{2 \cdot J_1\left(\frac{2\pi \cdot R_K}{\lambda_0} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{2\pi \cdot R_K}{\lambda_0} \cdot \sin\theta} - \frac{r_K^2}{R_K^2 - r_K^2} \cdot \frac{2 \cdot J_1\left(\frac{2\pi \cdot r_K}{\lambda_0} \cdot \sin\theta\right)}{\frac{2\pi \cdot r_K}{\lambda_0} \cdot \sin\theta}. \quad (80)$$

4.2 Дискретные антенны

Дискретные антенны классифицируются по следующим основным признакам:

– по форме излучающей поверхности: линейные, плоские и конформные (цилиндрические, сферические и т. д.);

– по составу: однородные (сформированные из одинаковых преобразователей) и неоднородные (сформированные из преобразователей разного типа);

– по структуре: эквидистантные (с одинаковым межцентровым расстоянием) и неэквидистантные;

– по закону возбуждения: синфазные равноамплитудные, синфазные (амплитуды преобразователей различны), равноамплитудные (фазы преобразователей различны) и с амплитудно-фазовым распределением по заданному закону;

– по принципу формирования характеристики направленности в режиме приема: аддитивные (суммирование сигнала по всем элементам) и мультипликативные (перемножение сигналов отдельных элементов или их аддитивных групп).

Конфигурация произвольной линейной дискретной аддитивной антенны, состоящей из ненаправленных элементов с произвольными межцентровыми расстояниями и амплитудно-фазовым распределением, представлена на рис. 9.

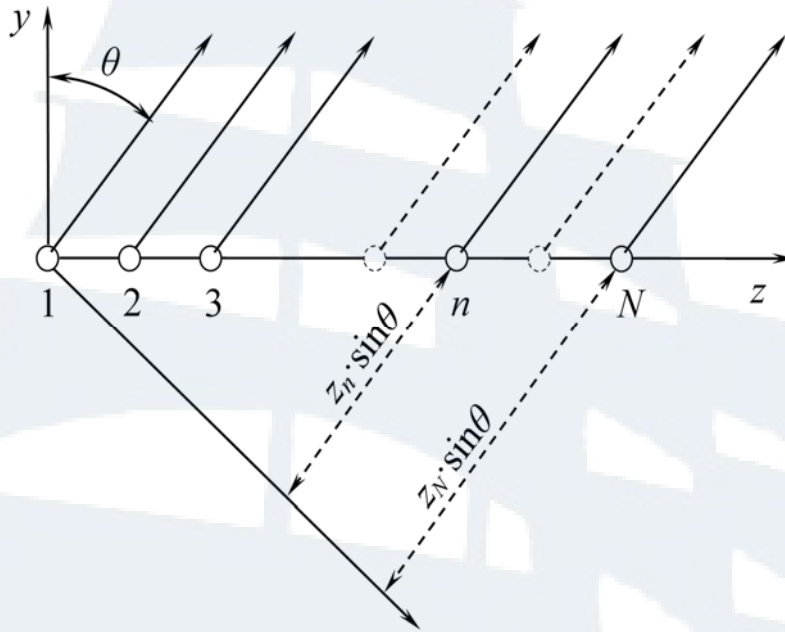


Рис. 9. Произвольная линейная антенна из N ненаправленных излучателей

Характеристика направленности такой антенны описывается следующей формулой:

$$R(\theta) = \sum_{n=0}^N A_n \cdot e^{j \cdot k \cdot z_n \cdot \sin \theta} . \quad (81)$$

Далее будут рассмотрены дискретные однородные эквидистантные антенны с различной формой рабочей поверхности.

Методика расчета таких антенн может использоваться также для определения характеристики направленности дискретных цилиндрических антенн в плоскости образующей.

Характеристики направленности компенсированных в направлении θ_k дискретных эквидистантных линейных антенн (рис. 10) в зависимости от закона изменения возбуждения составляющих их элементов рассчитывается по представленным ниже формулам.

Характеристика направленности компенсированной дискретной антенны с равномерным амплитудным распределением, составленная из N элементов конечных размеров с характеристикой направленности $R_1(\theta)$ рассчитывается по формуле:

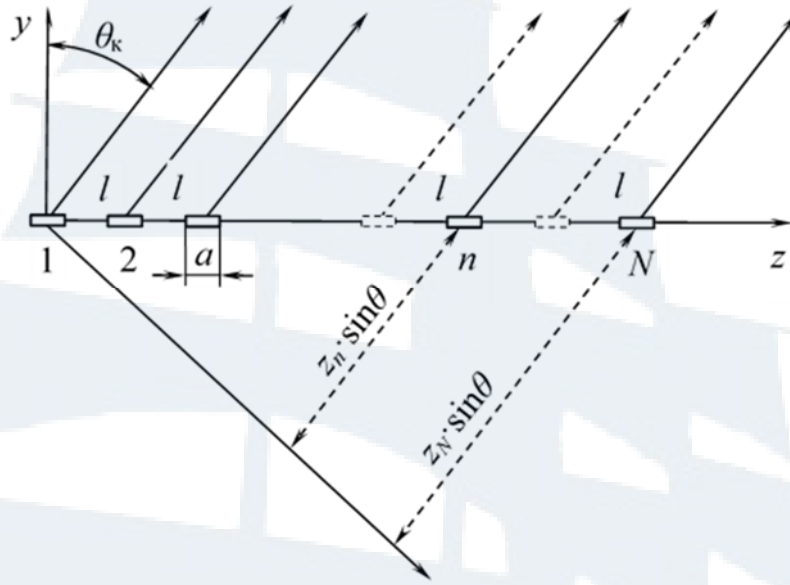


Рис. 10. Дискретная эквидистантная линейная антенна из направленных излучателей

$$R(\theta) = \frac{\left| \sin \left[N \cdot \frac{\pi \cdot l}{\lambda_0} \cdot \sin(\theta - \theta_k) \right] \right|}{\left| N \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot l}{\lambda_0} \cdot \sin(\theta - \theta_k) \right] \right|} \cdot |R_1(\theta)|. \quad (82)$$

Характеристика направленности $R_1(\theta)$ элементов, составляющих антенну, в зависимости от формы их излучающей поверхности определяется выражениями (78) или (79). Для ненаправленных элементов $R_1(\theta) = 1$.

Количество элементов в антенне N при заданных межцентровом расстоянии l и ширине главного лепестка характеристики направленности на уровне 0,7 по давлению 2θ определяется в результате решения следующего уравнения относительно N и округляется до целого числа:

$$\frac{\sin(N \cdot \frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot \sin \theta_{0,7})}{N \cdot \frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot \sin \theta_{0,7}} = 0,7. \quad (83)$$

Максимальный угол компенсации $\theta_{k \max}$, при котором отсутствуют дополнительные единичные максимумы, определяется следующим выражением:

$$\theta_{k \max} \leq \arcsin \left[\frac{\lambda \cdot (N-1)}{N \cdot l} - 1 \right]. \quad (84)$$

Значения N и θ_k в формуле (82) вычисляются, исходя из условий (83-84) соответственно. Если эти значения заданы в техническом задании, необходимо проверить их на соответствие указанным условиям.

Характеристика направленности дискретной антенны с амплитудным распределением:

а) при чётном числе элементов в антенне N :

$$R(\theta) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} A_i \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot (2i-1) (\sin \theta - \sin \theta_k) \right]}{\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} A_i} \right| \cdot |R_1(\theta)|; \quad (85)$$

б) при нечётном числе элементов в антенне N :

$$R(\theta) = \left| \frac{A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} A_i \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot i \cdot \pi \cdot l}{\lambda} \cdot (\sin \theta - \sin \theta_k) \right]}{A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} A_i} \right| \cdot |R_1(\theta)|. \quad (86)$$

Характеристика направленности мультипликативной дискретной антенны с амплитудным распределением в зависимости от количества элементов в группах:

а) при чётном числе элементов в каждой группе:

$$R(\theta) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{\frac{n_1}{2}} A_i \cdot F_{\text{ч}}(\theta, i)}{\sum_{i=1}^{\frac{n_1}{2}} A_i} \right| \cdot \left| \frac{\sum_{i=1}^{\frac{n_2}{2}} B_i \cdot F_{\text{ч}}(\theta, i)}{\sum_{i=1}^{\frac{n_2}{2}} B_i} \right| \cdot F(\theta) \cdot |R_1(\theta)|^2, \quad (87)$$

где $F_{\text{ч}}(\theta, i) = \cos \left[\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot (2i - 1) (\sin \theta - \sin \theta_{\text{к}}) \right],$ (88)

$$F(\theta) = \cos \left[\frac{\pi \cdot L}{\lambda} \cdot (\sin \theta - \sin \theta_{\text{к}}) \right]; \quad (89)$$

б) при нечётном числе элементов в каждой группе:

$$R(\theta) = \left| \frac{A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_1-1}{2}} A_i \cdot F_{\text{н}}(\theta, i)}{A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_1-1}{2}} A_i} \right| \cdot \left| \frac{B_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_2-1}{2}} B_i \cdot F_{\text{н}}(\theta, i)}{B_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_2-1}{2}} B_i} \right| \cdot F(\theta) \cdot |R_1(\theta)|^2, \quad (90)$$

где $F_{\text{н}}(\theta, i) = \cos \left[\frac{2i \cdot \pi \cdot l}{\lambda} \cdot (\sin \theta - \sin \theta_{\text{к}}) \right];$ (91)

в) при чётном числе элементов в одной группе и нечётном – в другой:

$$R(\theta) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{\frac{n_1}{2}} A_i \cdot F_{\text{ч}}(\theta, i)}{\sum_{i=1}^{\frac{n_1}{2}} A_i} \right| \cdot \left| \frac{B_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_2-1}{2}} B_i \cdot F_{\text{н}}(\theta, i)}{B_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_2-1}{2}} B_i} \right| \cdot F(\theta) \cdot |R_1(\theta)|^2. \quad (92)$$

Характеристики направленности дискретных эквидистантных кольцевых антенн (рис. 8, з) в зависимости от закона изменения возбуждения составляющих их элементов рассчитываются по следующим формулам:

а) характеристика направленности дискретной эквидистантной кольцевой антенны в плоскости оси симметрии:

$$R(\theta) = \left| \begin{aligned} & J_0\left(\frac{2\pi \cdot r_k \cdot \sin \theta}{\lambda}\right) + \\ & + 2 \sum_{m=1}^{\infty} j^{mN} \cdot J_{mN}\left(\frac{2\pi \cdot r_k \cdot \sin \theta}{\lambda}\right) \cdot \cos(mN \cdot \varphi) \end{aligned} \right| ; \quad (93)$$

б) характеристика направленности дискретной эквидистантной кольцевой антенны компенсированной в плоскости оси симметрии:

$$R(\theta) = \left| \begin{aligned} & J_0\left(\frac{2\pi \cdot r_k \cdot \sin \frac{\theta - \theta_k}{2}}{\lambda}\right) + \\ & + 2 \sum_{m=1}^{\infty} j^{mN} \cdot J_{mN}\left(\frac{2\pi \cdot r_k \cdot \sin \frac{\theta - \theta_k}{2}}{\lambda}\right) \cdot \cos(mN \cdot \varphi) \end{aligned} \right| ; \quad (94)$$

в) характеристика направленности группы концентрических дискретных кольцевых антенн с амплитудным распределением:

$$R(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^D A_i \cdot M_i} \cdot \left| \begin{aligned} & \sum_{i=1}^D A_i \cdot M_i \cdot J_0\left(\frac{2\pi \cdot r_k \cdot \sin \theta}{\lambda}\right) + \\ & + 2 \sum_{m=1}^{\infty} j^{mM_i} \cdot J_{mM_i}\left(\frac{2\pi \cdot r_{ki} \cdot \sin \theta}{\lambda}\right) \cdot \cos(mM_i \cdot \varphi) \end{aligned} \right| . \quad (95)$$

Особый интерес представляют дискретные дуговые антенны, поскольку они являются моделью для расчета характеристики направленности дискретной акустически непрозрачной (экранированной) цилиндрической антенны в плоскости направляющей цилиндра.

Характеристики направленности в плоскости дуги дискретной эквидистантной дуговой антенны из ненаправленных элементов (рис. 11) в зависимости от закона изменения амплитуды возбуждения элементов с учетом затенения рассчитывается по формуле (96).

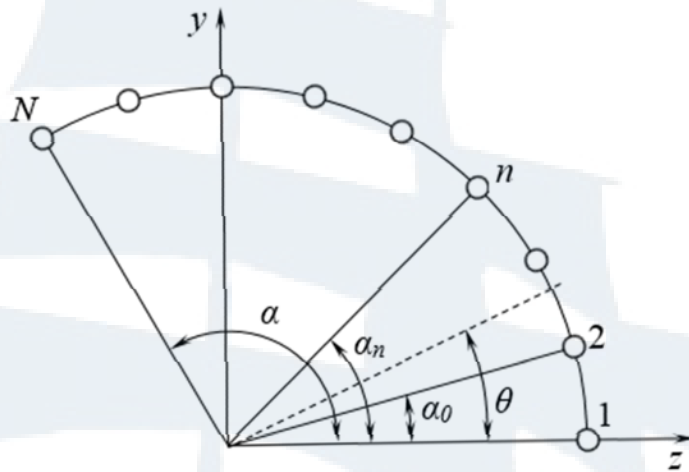


Рис. 11. Эквидистантная дуговая антенна из N ненаправленных излучателей

$$R(\theta) = \left| \sum_{m=1}^N A_m \cdot [1 + \cos(\theta - m\alpha_0)] \cdot e^{j \cdot k \cdot r_d \cdot \cos(\theta - m\alpha_0)} \right|, \quad (96)$$

где $\alpha_0 = \frac{\alpha}{N-1}$ – угловое межцентровое расстояние составляющих дугу элементов.

Полученную зависимость $R(\theta)$ необходимо нормировать относительно максимального значения.

5. Синтез характеристик направленности антенн

Задача синтеза является обратной задачей, решаемой при конструировании антенн. При синтезе антенны по заданной характеристике направленности выбирают один из следующих путей:

- при синфазном и равноамплитудном возбуждении строится не эквидистантная антенна, при этом определяется закон размещения активных элементов (преобразователей) по поверхности антенны;
- для эквидистантной конструкции антенны рассчитывается закон амплитудо-фазового распределения возбуждения составляющих ее элементов [2].

Очевидно, что вид формул, используемых при расчетах, зависит как от формы и состава антенны, так и от метода решения задачи синтеза, выбранного в процессе проектирования.

5.1. Синтез характеристики направленности дискретной эквидистантной линейной антенны по методу Дольфа-Чебышева

Распределение амплитуд возбуждения преобразователей в антенне, при котором её характеристика имеет оптимальную форму, определяется следующими формулами:

а) при чётном числе элементов в антенне $N = 2n$:

$$A_i = (2n-1) \cdot X_0^{2i-1} \cdot \sum_{m=0}^{n-i} (-1)^{n-i-m} \cdot X_0^{2m} \cdot \frac{(n+i+m-2)!}{m! \cdot (2i+m-1)! \cdot (n-i-m)!}, \quad (97)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots n$;

б) при нечётном числе элементов в антенне $N = 2n+1$:

$$A_i = 2n \cdot X_0^{2i} \cdot \sum_{m=0}^{n-i} (-1)^{n-i-m} \cdot X_0^{2m} \cdot \frac{(n+i+m-1)!}{m! \cdot (2i+m)! \cdot (n-i-m)!}, \quad (98)$$

где $i = 0, 1, 2, 3 \dots n$.

Параметр X_0 в формулах (97-98) вычисляется по следующей формуле:

$$X_0 = 0,5 \cdot \left[\left(Q + \sqrt{Q^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} + \left(Q - \sqrt{Q^2 - 1} \right)^{\frac{1}{N-1}} \right]. \quad (99)$$

Количество элементов в антенне N и расстояние между их центрами l определяются как решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2\pi \cdot l}{\lambda} = \frac{2 \cdot \arccos \left\{ \operatorname{ch} \left[\frac{\operatorname{arch} \left(\frac{Q\sqrt{2}}{2} \right)}{N-1} \right] \cdot \operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{\operatorname{arch} Q}{N-1} \right) \right\}}{\sin \theta_{0,7} - \sin \theta_k} \\ \frac{2\pi \cdot l}{\lambda} \leq \frac{2 \cdot \arccos \left[-\operatorname{ch}^{-1} \left(\frac{\operatorname{arch} Q}{N-1} \right) \right]}{1 + \sin \theta_k} \end{array} \right. \quad (100)$$

Характеристика направленности антенны с полученным амплитудным распределением возбуждения преобразователей рассчитывается по формулам:

а) для чётного числа элементов $N = 2n$:

$$R(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n A_i} \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot \cos \left\{ (2i-1) \left[\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot (\sin \theta - \sin \theta_k) \right] \right\}; \quad (101)$$

б) для нечётного числа элементов $N = 2n + 1$:

$$R(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=0}^n A_i} \cdot \sum_{i=0}^n A_i \cdot \cos \left\{ 2i \left[\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \cdot (\sin \theta - \sin \theta_k) \right] \right\}. \quad (102)$$

Количество преобразователей в антенне N и межцентровое расстояние l могут быть заданы в исходных данных или рассчитаны по формуле (83).

5.2. Синтез характеристик направленности дискретной эквидистантной линейной антенны по методу Фурье

Вычисление комплексных коэффициентов возбуждения A_m элементов дискретной линейной антенны сводится к решению приведенной ниже системы линейных уравнений относительно этих коэффициентов [2]:

$$\Phi_n(z_n) = \sum_{m=1}^N A_m \cdot B_{mn}(z_n, z_m), \quad (103)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots N$.

Левая часть системы уравнений (101) вычисляется по формуле:

$$\Phi_n(z_n) = \int_0^{\pi} q^2(\theta) \cdot e^{-j \cdot k \cdot Z_n \cdot \sin \theta} \cdot R_0(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta, \quad (104)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$. (105)

Функция $q(\theta)$ может быть задана в двух вариантах:

1) при необходимости учета различных требований к точности воспроизведения главного лепестка и боковых лепестков характеристики направленности:

$$q(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{при } -\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 \\ 1-\varepsilon, & \text{при } \theta < -\theta_0, \theta > \theta_0 \end{cases}; \quad (106)$$

2) если указанные выше требования одинаковы в пределах всей характеристики направленности:

$$q(\theta) = 1, \quad \text{при всех } \theta. \quad (107)$$

Координата центра n -го элемента антенны z_n определяется выражением:

$$z_n = (n - 1) \cdot l, \quad n = 1, 2 \dots N. \quad (108)$$

Реализуемая характеристика направленности $R_0(\theta)$ определяется следующей формулой:

$$R_0(\theta) = \begin{cases} \tilde{R}(\theta), & \text{при } -\theta_0 < \theta < \theta_0 \\ 0, & \text{при } \theta \leq -\theta_0, \theta \geq \theta_0 \end{cases}. \quad (109)$$

В формуле (109) функция $\tilde{R}(\theta)$ может быть задана следующими вариантами:

$$1) \tilde{R}(\theta) = \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0}\right); \quad (110)$$

$$2) \tilde{R}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0}\right); \quad (111)$$

$$3) \tilde{R}(\theta) = 1. \quad (112)$$

Коэффициенты $B_{nm}(z_n, z_m)$ вычисляются по формуле:

$$B_{nm}(z_n, z_m) = \int_0^{\pi} R_1(\theta) \cdot q^2(\theta) \cdot e^{j \cdot k \cdot (z_m - z_n) \cdot \sin \theta} \cdot \cos \theta \cdot d\theta, \quad (113)$$

где $z_m = (m - 1) \cdot l$, $m = 1, 2, 3 \dots N$.

Характеристика направленности отдельного элемента $R_1(\theta)$ определяется по формулам (72-73), либо в случае ненаправленных элементов полагается $R_1(\theta) = 1$.

Система уравнений (103) с учетом (104) и (113) решается относительно A_m . При этом определяются модули $|A_m|$ и аргументы $\arg A_m$. Модули $|A_m|$ нормируются относительно максимального значения.

Фаза m -го элемента β_m вычисляется по формуле:

$$\beta_m = \arg A_m - \arg A_1. \quad (114)$$

Характеристика направленности антенны рассчитывается с использованием определённых выше коэффициентов амплитудно-фазового распределения возбуждения по формуле:

$$|R(\theta)| = q(\theta) \cdot \left| \sum_{m=1}^N A_m \cdot e^{j \cdot (k z_m \sin \theta + \beta_m)} \right| \cdot |R_1(\theta)|. \quad (115)$$

В формулах (113) и (115) волновое число k вычисляется по формуле (105).

5.3. Синтез характеристик направленности дискретной эквидистантной дуговой антенны по методу Фурье

Вычисление комплексных коэффициентов возбуждения A_m элементов дискретной дуговой антенны сводится к решению приведенной ниже системы линейных уравнений относительно этих коэффициентов [2]:

$$\Phi_n(\theta_n) = \sum_{m=1}^N A_m \cdot B_{mn}(\theta_n, \theta_m), \quad (116)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots N$.

Левая часть системы уравнений (114) вычисляется по формуле:

$$\Phi_n(\theta_n) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} e^{-j \cdot k \cdot r_d \cdot \cos(\theta - \theta_n)} \cdot R_0(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta. \quad (117)$$

Реализуемая характеристика направленности $R_0(\theta)$ определяется по одной из следующих формул:

$$1) R_0(\theta) = \begin{cases} \tilde{R}(\theta), & \text{при } \theta_0 < \theta < \theta_0 \\ 0, & \text{при } \theta \leq \theta_0, \theta \geq \theta_0 \end{cases}; \quad (118)$$

$$2) R_0(\theta) = 1. \quad (119)$$

Функция $R(\theta)$ в формуле (118) может быть задана следующими вариантами:

$$1) \tilde{R}(\theta) = \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot \theta_0} \left(\theta - \frac{\alpha}{2} + \theta_0\right)\right); \quad (120)$$

$$2) \tilde{R}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2 \cdot \theta_0} \left(\theta - \frac{\alpha}{2} + \theta_0\right)\right); \quad (121)$$

$$3) \tilde{R}(\theta) = 1. \quad (122)$$

Угловая координата n -го элемента антенны определяется по формуле:

$$\theta_n = (n - 1) \cdot \alpha_0, \quad (123)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots N$.

Коэффициенты $B_{nm}(\theta_n, \theta_m)$ вычисляются по формуле:

$$B_{nm}(\theta_n, \theta_m) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} R_m(\theta) \cdot [1 + \cos(\theta - \theta_m)] \cdot e^{j \cdot k \cdot r_d [\cos(\theta - \theta_m) - \cos(\theta - \theta_n)]} d\theta . \quad (124)$$

Угловая координата m -го элемента антенны определяется по формуле:

$$\theta_m = (m - 1) \cdot \alpha_0, \quad (125)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots N$.

Характеристика направленности m -го элемента $R_m(\theta)$ может быть задана одним из трёх вариантов:

1) для элементов прямоугольной формы размером a в рассматриваемой плоскости:

$$R_m(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sin(\theta - \theta_m)\right]}{\frac{\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \sin(\theta - \theta_m)} ; \quad (126)$$

2) для элементов круглой формы диаметром d :

$$R_m(\theta) = \frac{2 \cdot J_1\left[\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin(\theta - \theta_m)\right]}{\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin(\theta - \theta_m)} ; \quad (127)$$

3) для ненаправленных элементов: $R_m(\theta) = 1$. (128)

Система уравнений (116) с учетом (117) и (124) решается относительно A_m . При этом определяется модуль $|A_m|$ и аргумент $\arg A_m$. Модули всех A_m нормируются относительно максимального значения.

Фаза m -го элемента β_m вычисляется по формуле:

$$\beta_m = \arg A_m - \arg A_1 . \quad (129)$$

Характеристика направленности антенны рассчитывается с использованием определённых выше коэффициентов амплитудно-фазового распределения возбуждения по формуле:

$$|R(\theta)| = \left| \sum_{m=0}^N A_m \cdot [1 + \cos(\theta - \theta_m)] \cdot e^{j \cdot [k \cdot z_m \cdot \cos(\theta - \theta_m) + \beta_m]} \cdot R_m(\theta) \right|. \quad (130)$$

6. Конструктивное оформление гидроакустических антенн

6.1. Разработка конструкции электроакустического преобразователя

Итогом предварительной оценки энергетических свойств гидроакустического канала является выбор конструктивного исполнения электроакустического преобразователя (варианты конструкций подробно рассмотрены в разделе 2 настоящего руководства) и определение количества преобразователей в антенне.

Введение в конструкцию преобразователя частотопонижающих накладок позволяет уменьшить собственную частоту продольного резонанса пьезоэлементов (для конкретной конфигурации пьезоэлемента она является константой) до нужной величины.

В общем случае накладки могут быть выполнены из разных материалов. При этом необходимо помнить, что амплитуда механических колебаний накладок из более легких металлов (а значит и излучаемая ими мощность) при прочих равных условиях всегда выше, чем у накладок из более тяжелого металла. Помимо этого, материал излучающей накладки должен отвечать требованию наилучшего согласования с рабочей средой – водой. Это значит, что удельное акустическое сопротивление $(\rho c)_1$ этого материала должно быть по возможности ближе к такому же параметру воды $(\rho c)_0$. Поэтому в качестве материала для рабочей, т. е. излучающей накладки (в конструкции рис. 2 это накладка 1) целесообразно выбрать титановый сплав ВТ1-0 (плотность $\rho_1 = 4,52 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_1 = 5,1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) [13]. Тем самым изложенные выше требования в достаточной степени будут удовлетворены.

Конечно, можно выбрать в качестве материала для излучающей накладки и более лёгкий металл, например, алюминиевый сплав. Однако недостаточная коррозионная стойкость (особенно в контакте

с другими металлами, с которыми они образуют гальваническую пару) и относительно невысокие прочностные характеристики этого материала значительно усложняют как саму конструкцию преобразователя, так и технологию его сборки. При этом не достигается значительного улучшения свойств конечного продукта.

Тыльная (нерабочая) накладка (в конструкции на рис. 2 это накладка 4) выполнена из более тяжелого материала, не подверженного коррозии, например, из нержавеющей стали X18H9T (плотность $\rho_4 = 7,86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_4 = 5,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) [13].

Материал болта (позиция 5 на рис. 2) должен обеспечивать возможность получения необходимого усилия армирования ($19,6 \pm 1 \text{ МПа}$), сохраняя при этом целостность всей конструкции. В качестве такого материала, приемлемого в плане соотношения цены и прочностных характеристик, может быть выбрана, например, сталь 40X (плотность $\rho_5 = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_5 = 5,05 \cdot 10^3 \text{ м/с}$).

Для достижения надежного электрического и акустического контактов между пьезоэлементами 3, накладками 2 и 4 и лепестком 6 предусмотрено клеевое соединение эпоксидным компаундом горячего отверждения ДМ-5-65 с вкраплениями токопроводящего клея ДС-65 (см. Приложение 5). Оба эти компаунда разработаны специально для склеивания пьезокерамических элементов с металлическими конструкциями. В состав компаунда ДМ-5-65 включены ингредиенты, которые позволяют компенсировать, во-первых, – резкий перепад акустических сопротивлений (ρc) между металлом и пьезокерамикой и во-вторых, – разницу коэффициентов температурного расширения этих материалов. Последнее имеет значение для сохранения целостности пьезоэлементов при отверждении клея в термостате. Клеевой компаунд ДС-65 имеет ту же эпоксидную основу, что и ДМ-5-65, но в качестве наполнителя в нем используется серебряный порошок молекулярной дисперсности.

Поскольку токопроводящий клей имеет более высокую жесткость, его наносят малыми вкраплениями (до 2 мм в диаметре), причем эти вкрапления должны располагаться вблизи внешней боковой поверхности пьезоэлемента симметрично по диаметру кольца. Такие вкрапления наносятся на оба электрода пьезоэлемента, т. е. с двух сторон кольца, строго напротив. Необходимость выполнения этого требования диктуется тем, что пьезокерамика является довольно хрупким материалом. При значительных изгибающих усилиях пьезоэлемент может треснуть, что приведет к нарушению необходимого режима колебаний преобразователя, т. е. к браку при сборке.

Тем же требованием сохранения механической целостности пьезоэлементов продиктован выбор материала лепестка 6. В качестве такого материала может использоваться лента из мягкой меди ДПРНМ, которая при значительных усилиях стяжки пакета преобразователя при сборке деформируется, компенсируя тем самым возникающий по разным объективным причинам возможный перекосяк в конструкции. Кроме того, медь хорошо поддается пайке, что является существенным фактором повышения надежности контакта при монтаже антенны.

Многолетний опыт мелкосерийного производства гидроакустических антенн показал, что самым слабым звеном в процессе сборки преобразователей является пьезоэлемент. Наибольший процент брака преобразователей на конечном этапе их сборки имеет место именно из-за трещин в пьезоэлементах. Как было сказано выше – это довольно хрупкие изделия, не допускающие больших изгибающих усилий, поэтому весь технологический процесс сборки должен исключать или компенсировать возможность их появления.

Чтобы снизить вероятность возникновения брака на начальном этапе производства все 100 % пьезоэлементов должны проходить входной контроль, описанный в Приложении 3. Этот технологический процесс предусматривает измерение частоты и амплитудных значений резонанса и антирезонанса радиальных механических колебаний, а также статической электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. По результатам входного контроля из производства исключаются пьезоэлементы, не соответствующие требованиям нормативной документации.

Весь процесс сборки преобразователей подобной конструкции регламентирован стандартом предприятия изготовителя, формат которого представлен в Приложении 5. В этом документе должны быть учтены все указанные выше технологические особенности процесса сборки, а также технологические возможности (оборудование, оснастка и т. д.) предприятия-изготовителя.

Все приборы и механизмы, установленные на борту судна, подвергаются воздействию ударных и вибрационных нагрузок большой амплитуды и довольно широкого спектра [10; 12]. Резьбовые соединения, как правило, присутствующие в любой конструкции, в таких условиях имеют тенденцию к самоотвинчиванию, что может привести к нарушению их нормального функционирования.

Этот аспект особенно важен для гидроакустических антенн, которые сами совершают высокочастотные механические колебания

в рабочем режиме. Ослабление усилия затяжки резьбовых соединений в конструкции антенн может привести, например, к нарушению электрических и механических контактов в преобразователях, что повлечет за собой выход из строя всего изделия.

В связи с этим при конструировании антенн проблеме контроля резьбовых соединений уделяется очень большое внимание. Для этого используют такие конструктивные элементы, как пружинные шайбы Гровера, проволочную затяжку и т. д. Там, где воспользоваться перечисленными способами невозможно, при сборке в самом резьбовом соединении используют вязкие (лаки, краски) и жесткие (клеевые) фиксирующие или тормозящие смазки.

Для предотвращения самоотвинчивания болта 5 (рис. 2), стягивающего конструкцию преобразователя, использован эпоксидный клей ДГ-65, токопроводящим наполнителем в котором является графитовый порошок.

Капролоновая (полиэтиленовая или фторопластовая) втулка 7 (рис. 2) выполняет в конструкции преобразователя как роль изолятора, так и роль фиксирующего конструктивного элемента. Она предотвращает возможность смещения пьезоэлемента 3, лепестков 6, накладок 1 и 4 в радиальном направлении, исключая возможность электрического контакта электродов пьезоэлементов и лепестка с поверхностью болта.

6.2. Разработка конструкции антенны

Как было сказано выше, количество преобразователей в антенне определяется размерами её излучающей поверхности, полученными в ходе предварительного расчёта, и поперечным размером рабочей наклейки преобразователя. Примеры размещения преобразователей в антенне («упаковки» преобразователей по поверхности антенны) представлены на рис. 12. Варианты *а* и *б* соответствуют круглой и прямоугольной формам излучающей поверхности соответственно.

При расчёте характеристики направленности антенн подобной дискретной структуры используют теоремы умножения и смещения, которые приводят к формулам (81, 82, 85, и 86). В этом случае в качестве амплитудного распределения рассматривают количество синфазных равноамплитудных преобразователей, имеющих проекцию в одну и ту же точку выбранной базы. Пример использования этого принципа для антенны круглой (фактически шестигранной) формы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях представлен на рис. 13.

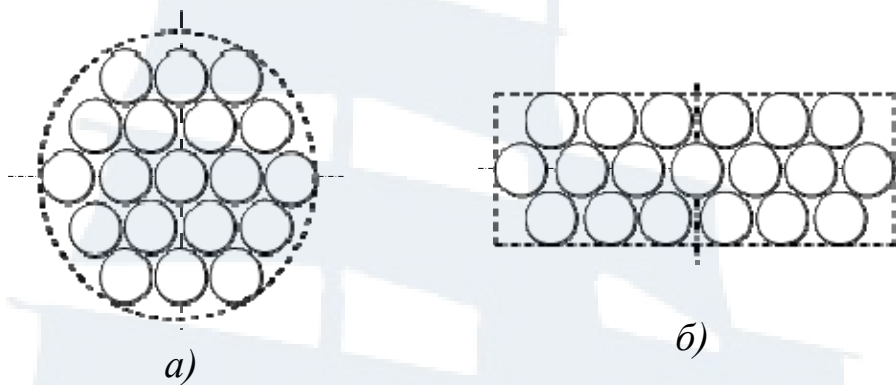


Рис. 12. Примеры размещения преобразователей в антенне круглой формы «а» и прямоугольной формы «б»

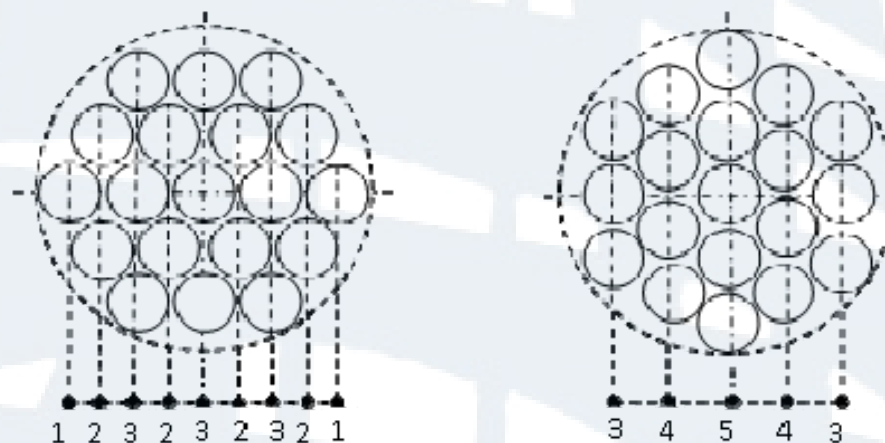


Рис. 13. Пример формирования дискретной линейной базы с амплитудным распределением при расчете характеристики направленности дискретной антенны

В качестве примера на рис. 14 представлен чертеж эскизного варианта конструктивного исполнения антенны круглой формы.

В состав антенны входит семь электроакустических преобразователей 1 предварительно напряженной конструкции, описанной выше. Электрические преобразователи соединены между собой параллельно. Для этого головки болтов преобразователей соединены с помощью винтов 8 перемычками 9, а центральные лепестки – монтажным проводом 10 с помощью пайки 11.

Электрические выводы антенны 3 и 4 подсоединены к каждому из электрических полюсов конструкции (головкам болтов и центральным лепесткам). Эти выводы выполнены центральным герметизированным проводом кабеля КГ1-180, имеющим многожильную медную токоведущую часть с фторопластовой герметизирующей оболочкой,

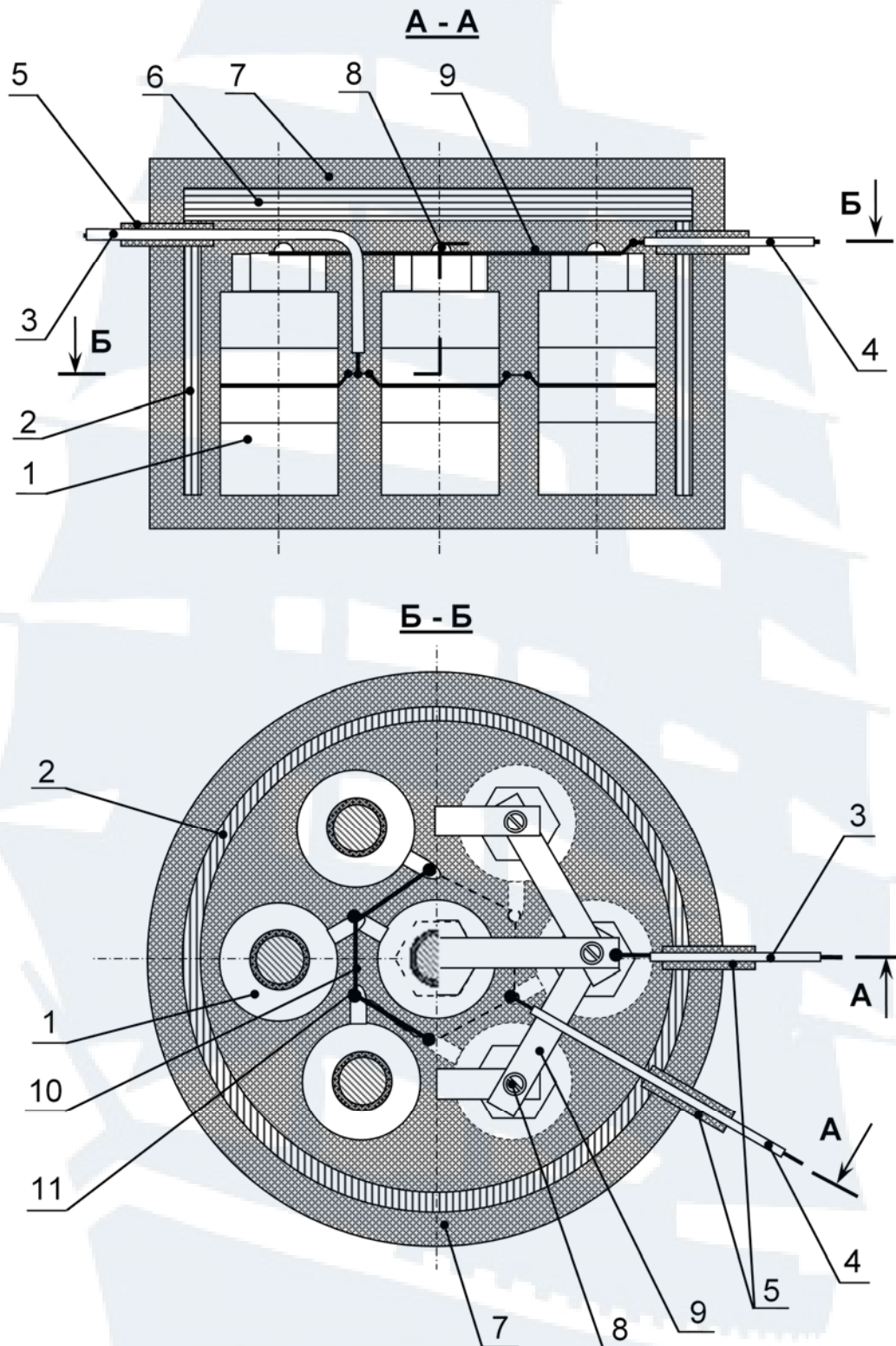


Рис. 14. Эскиз конструкции мозаичной гидроакустической антенны круглой формы

благодаря которой провод способен сохранять герметичность и изоляционные свойства в широком диапазоне рабочих температур (от – 50 до 200 °С), поскольку кабель КГ1-180 был разработан для обслуживания опускаемого в скважины оборудования.

Как правило, при описании формы характеристики направленности антенны, её излучающую поверхность представляют бесконечно тонкой и помещают в абсолютно жесткий (или абсолютно мягкий) акустический экран. В этих идеализированных условиях акустическое поле антенны формируется в пределах углов обзора 180°, а тыльные области в формировании поля в рабочем направлении не участвуют. При таких допущениях получают сравнительно простое математическое описание излучаемого антенной поля в дальней зоне.

В реальных конструкциях антенн активные элементы имеют конечные размеры во всех направлениях, поэтому приближение к идеальным условиям достигается путем акустического экранирования нерабочих (боковой и тыльной) поверхностей преобразователей. Для этих целей в конструкцию антенны включены два акустических экрана – боковой 2 и тыльный 6. Оба экрана выполнены из тонкой бумаги. Боковой экран представляет собой многослойную (10-20 слоев) конструкцию цилиндрической формы, а тыльный – плоскую многослойную конструкцию (до 30 слоев и более) круглой формы.

Именно многослойность конструкции экранов (т. е. наличие между слоями воздушных прослоек, которые имеют хорошие экранирующие свойства) позволяет достигнуть достаточно хорошего экранирующего эффекта. Количественные характеристики эффективности таких экранов определяются экспериментально. Они зависят от рабочей частоты антенны, её размеров, толщины и количества слоев в экранах и других параметров.

Герметизирующая оболочка 7 антенны выполнена из специального полиуретанового заливочного компаунда. Необходимо отметить, что для этих целей могут быть использованы и другие полиуретановые компаунды. Обязательное условие при этом – хорошая автоадгезия, т. е. способность прочно соединяться на границе раздела слоев разного срока заливки. Это свойство материала обеспечивает возможность многократной поэтапной заливки изделия и значительно упрощает как непосредственно технологию формирования герметизирующей оболочки, так и конструктивное исполнение антенны в целом. Указанное свойство автоадгезии полиуретанового компаунда позволяет также надежно и сравнительно просто герметизировать электрические выводы антенны. Втулки 5 изготовлены из того же ма-

териала, что и вся оболочка антенны. Они имеют диаметр внутреннего отверстия меньше, чем диаметр проводов выводов 3 и 4. Благодаря этому при натягивании втулок на провода выводов они обжимают их с усилием, которого достаточно для обеспечения герметизации антенны при погружении ее на рабочую глубину.

Важным условием при выборе материала герметизирующей оболочки является адгезия его к металлам. Это условие продиктовано тем, что для эффективной передачи антенной акустической энергии в среду должны быть обеспечены условия наилучшего механического контакта (адгезии) излучающей поверхности антенны с материалом оболочки. Для улучшения адгезии полиуретанового компаунда к поверхности титановых излучающих накладок последние подвергаются специальной механической обработке – пескоструйке. В процессе этой операции излучающие поверхности подвергаются предварительному обезжириванию. Кроме того, приобретенная в результате этой операции дополнительная шероховатость обеспечивает увеличение активной поверхности накладки, участвующей в процессе адгезии. Непосредственно перед заливкой герметизирующей оболочки эти поверхности дополнительно обезжириваются спирто-бензиновой смесью и покрываются полиуретановым лаком, что значительно улучшает адгезию полиуретана к металлу.

Акустические свойства оболочки (удельное акустическое сопротивление ρc полиуретана; плотность $\rho_7 = 950 \text{ кг/м}^3$, скорость звука $c_7 = 1,45 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) близки к аналогичным показателям воды, поэтому через границу раздела между полиуретаном и водой акустическая энергия передается антенной в рабочую среду (воду) практически без потерь. Кроме того, этот материал имеет хорошие прочностные характеристики.

Существует целый ряд полиуретановых материалов, имеющих схожую технологию переработки, но отличающихся широким спектром свойств. Однако внедрение каждого из них в процесс изготовления антенн требует тщательного изучения как конструктивных свойств (прочность, технологичность и т. д.), так и специфических свойств (удельное акустическое сопротивление, стабильность параметров с течением времени и т. д.).

Приведённые выше рекомендации по конструктивному оформлению антенны и выбору для этого необходимых материалов не являются абсолютными. В каждом конкретном случае возможно использование как других конструкторских решений, так и других материалов. Но в любом случае этот выбор должен быть технически целесообразен и обоснован.

Заключительным этапом процесса изготовления гидроакустической антенны, как и любого другого выпускаемое производством изделия, является выходной контроль, которому подлежат все без исключения образцы. Эта процедура включает в себя следующие операции:

- 1) испытание на герметичность в специальной гидравлической камере высокого давления;
- 2) испытание на электрическую прочность путем измерения сопротивления изоляции с помощью мегомметра;
- 3) контроль электроакустических характеристик в измерительном гидроакустическом бассейне согласно перечню, представленному в табл. 5.

Методика проведения измерительных работ изложена в Приложении 6.

Таблица 5

Электроакустические характеристики антенны

№ п/п	Наименование характеристики, единицы измерения	Обозначение
1	Резонансная частота в режиме излучения, кГц	$f_{\text{изл}}$
2	Чувствительность по напряжению в режиме излучения, Па/В: – на резонансной частоте излучения; – на рабочей частоте	$\beta_{\text{изл}}$ $\beta_{\text{раб}}$
3	Резонансная частота в режиме приёма, кГц	$f_{\text{пр}}$
4	Чувствительность в режиме приёма, мкВ/Па: – на резонансной частоте излучения; – на рабочей частоте	$\gamma_{\text{пр}}$ $\gamma_{\text{раб}}$
5	Ширина частотной характеристики чувствительности в режиме излучения на уровне – 3дБ от максимального значения, кГц	Δf
6	Ширина характеристики направленности на уровне – 3 дБ от значения основного максимума (по давлению), градус	2θ
7	Активная составляющая полного электрического сопротивления, Ом	$R_{\text{ЭКВ}}$
8	Динамическая электрическая емкость, пФ	$C_{\text{ЭКВ}}$

Процесс измерения электроакустических характеристик антенны, в силу специфики самого изделия и условий его работы, требует использования специального технологического оборудования. Как правило – это специальное помещение с измерительным гидроакустическим бассейном, стены и дно которого покрыты поглощающими звук материалами (например, специальной рупорной резиной). Механическая часть измерительной установки представляет собой координатное устройство, позволяющее взаимно ориентировать объект измерения (антенну) и измерительный прибор (гидрофон или излучатель). Электрическая часть установки – это комплекс специальных измерительных приборов, созданный для построения конкретных измерительных схем. В измерительной лаборатории МариНПО, например, в качестве такого комплекса использовался специальный комплект измерительных приборов фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) – ведущего (и, пожалуй, единственного) изготовителя приборов такого назначения и класса.

В заключение необходимо отметить, что в настоящей работе была поставлена цель – собрать в единый пакет расчетный материал, имеющий практическое применение при проектировании гидроакустических каналов, и объединить его общей системой обозначения входящих в формулы компонентов. Это позволит облегчить использование представленного в работе материала и упростить процесс автоматизации необходимых расчетов. Можно сказать, что поставленная цель достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
2. Жуков В.Б. Расчет гидроакустических антенн по диаграмме направленности. – Л.: Судостроение, 1977. – 184 с.
3. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчёты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
4. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1986. – 272 с.

5. Колчеданцев А.С. Гидроакустические станции. – Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.

6. Кудрявцев В.И. Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий промышленного рыболовства. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 350 с.

7. Логинов К.В. Гидроакустические поисковые приборы. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 304 с.

8. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1973. – 182 с.

9. Орлов Л.В., Шабров А.А. Расчёт и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых станций. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 276 с.

10. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1980. – 232 с.

11. Сиротюк М.Г., Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации / в кн.: Физика и техника мощного ультразвука. – Т. 2. – М., 1968.

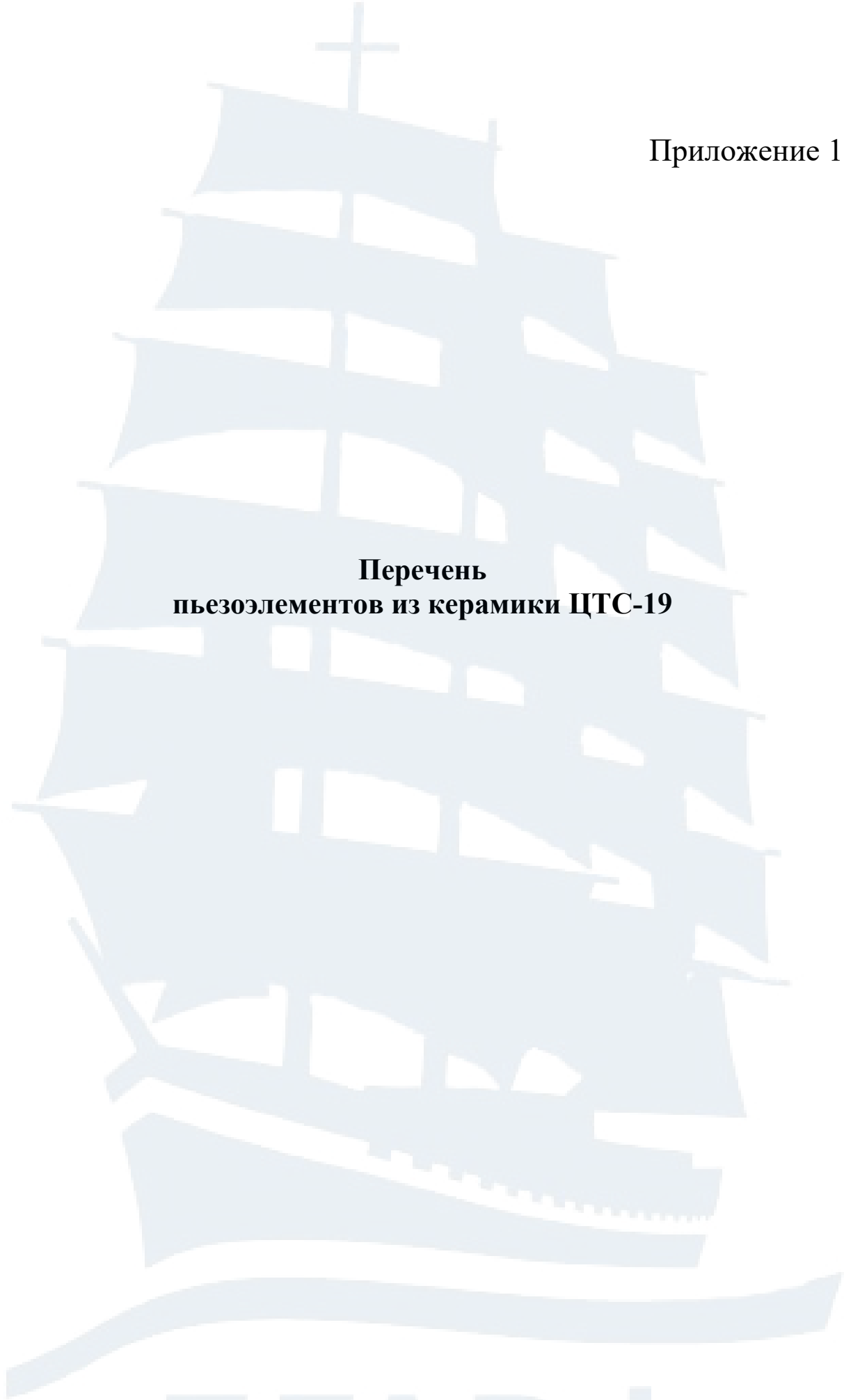
12. Справочник по гидроакустике / Евтютов А.П., Колесников А.Е., Корепин Е.А. и др. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.

13. Сташкевич А.П. Акустика моря. – Л.: Судостроение, 1966. – 350 с.

14. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

15. Юданов К.И. Гидроакустическая разведка рыбы. – СПб.: Судостроение, 1992. – 185 с.

**Перечень
пьезоэлементов из керамики ЦТС-19**



Вид пьезоэлемента в форме кольца, диска, прямоугольной призмы и обозначение его размеров представлены на рис. П1.1. Пунктиром обозначены поверхности, на которые нанесены электроды.

Размерный ряд пьезоэлементов различной формы представлен в табл. П1.1 – П1.3.

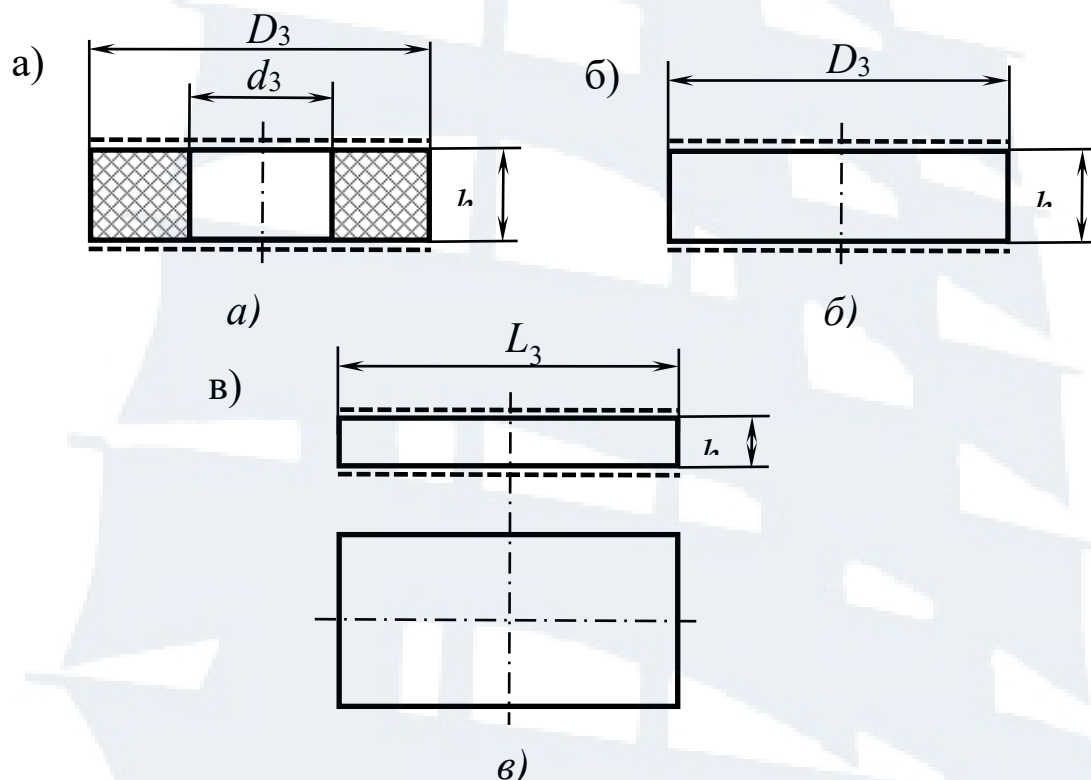


Рис. П1.1. Пьезоэлементы различной формы:
а) кольцо, б) диск, в) прямоугольная призма

Таблица П1.1

Кольца

Обозначение	Размеры, мм			Частота резонанса, f_p , кГц	
	D_3	d_3	h	Толщинного	Радиального
ЭП4К-17-1	30,00	10,00	1,50	950,00	47,77
ЭП4К-17-2	22,00	10,00	8,00	178,13	59,71
ЭП4К-17-3	30,00	13,00	10,00	142,50	44,44
ЭП4К-17-4	23,00	4,00	0,30	4 750,00	70,77
ЭП4К-17-5	23,00	4,00	0,40	3 562,50	70,77
ЭП4К-17-6	30,00	18,00	0,50	2 850,00	39,81

Окончание табл. П1.1

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>			<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_3</i>	<i>d_3</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП4К-17-7	40,00	16,50	3,50	407,14	33,82
ЭП4К-17-8	56,00	36,00	6,00	237,50	20,77
ЭП4К17-9	50,00	22,00	8,00	178,13	26,54
ЭП4К-17-10	50,00	20,00	8,00	178,13	27,30
ЭП4К-17-11	80,00	18,00	0,70	2 035,71	19,50
ЭП4К-17-12	25,00	10,00	1,00	1 425,00	54,60
ЭП4К-17-13	10,00	4,00	1,50	950,00	136,49
ЭП4К-17-14	50,00	20,00	3,00	475,00	27,30
ЭП4К-17-15	50,00	20,00	4,50	316,67	27,30
ЭП4К-17-16	50,00	20,00	6,00	237,50	27,30
ЭП4К-17-17	47,00	33,00	1,10	1 295,45	23,89
ЭП4К-17-18	40,00	30,00	1,50	950,00	27,30
ЭП4К-17-19	30,00	12,50	10,00	142,50	44,96
ЭП4К-17-20	18,00	4,00	0,30	4 750,00	86,86
ЭП4К-17-21	11,00	4,50	1,80	791,67	123,28
ЭП4К-17-22	10,00	3,50	1,50	950,00	141,54
ЭП4К-17-23	8,00	3,00	1,00	1425,00	173,71
ЭП4К-17-24	17,20	9,00	2,00	712,50	72,93
ЭП4К-17-25	8,00	4,00	1,00	1 425,00	159,24
ЭП4К-17-26	10,00	4,00	5,00	285,00	136,49
ЭП4К-17-27	20,00	8,00	0,80	1 781,25	68,24
ЭП4К-17-28	20,00	14,00	1,00	1 425,00	56,20
ЭП4К-17-29	24,00	17,00	1,00	1 425,00	46,61
ЭП4К-17-30	28,00	12,00	0,75	1 900,00	47,77
ЭП4К-17-31	29,00	23,00	9,00	158,33	36,75
ЭП4К-17-33	30,00	18,00	3,00	475,00	39,81
ЭП4К-17-34	30,00	18,00	4,00	356,25	39,81
ЭП4К-17-35	36,00	18,00	0,75	1 900,00	35,39
ЭП4К-17-36	36,00	18,00	1,50	950,00	35,39
ЭП4К-17-37	74,00	64,00	21,00	67,86	13,85
ЭП4К-17-38	50,00	40,00	1,80	791,67	21,23
ЭП4К-17-39	17,20	6,00	2,00	712,50	82,36
ЭП4К-17-40	25,00	14,00	4,00	356,25	49,00
ЭП4К-18-1	56,00	40,00	28,00	50,89	19,90
ЭП-3-04-ШБ-004-02	12,00	4,00	4,00	356,25	119,43

Диски

Обозначение	Размеры, мм		Частота резонанса, f_p , кГц	
	D_8	h	Толщинного (продольного)	Радиального (поперечного)
ЭП-3-18-ШБ-02	12,00	5,00	4,00	356,25
ЭП4Д-21-1	5,00	0,36	1 979,17	410,900006
ЭП4Д-21-2	5,00	0,72	1 425,00	410,96
ЭП4Д-21-3	5,00	1,00	3 958,33	410,96
ЭП4Д-21-4	6,00	0,36	3 958,33	342,47
ЭП4Д-21-5	8,00	0,36	1 979,17	256,85
ЭП4Д-21-6	8,00	0,72	1 425,00	256,85
ЭП4Д-21-7	8,00	1,00	1 979,17	256,85
ЭП4Д-21-8	6,00	0,72	2 850,00	342,47
ЭП4Д-21-9	10,000	0,50	3 958,33	205,48
ЭП4Д-21-10	10,00	0,36	570,00	205,48
ЭП4Д-21-11	10,00	2,50	1 979,17	205,48
ЭП4Д-21-12	10,00	0,72	1 425,00	205,48
ЭП4Д-21-13	10,00	1,00	950,00	205,48
ЭП4Д-21-14	10,00	1,50	712,50	205,48
ЭП4Д-21-15	10,00	2,00	142,50	205,48
ЭП4Д-21-16	10,00	10,00	3 958,33	205,48
ЭП4Д-21-17	12,00	0,36	1 979,17	171,23
ЭП4Д-21-18	12,00	0,72	1 425,00	171,23
ЭП4Д-21-19	12,00	1,00	712,50	171,23
ЭП4Д-21-20	12,00	2,00	475,00	171,23
ЭП4Д-21-21	10,00	3,00	3 958,33	205,48
ЭП4Д-21-22	15,00	0,36	2 850,00	136,99
ЭП4Д-21-23	15,00	0,50	2 035,71	136,99
ЭП4Д-21-24	15,00	0,70	3 958,33	136,99
ЭП4Д-21-25	18,00	0,36	1 979,17	114,16
ЭП4Д-21-26	18,00	0,72	1 425,00	114,16
ЭП4Д-21-27	18,00	1,00	237,50	114,16
ЭП4Д-21-28	20,00	6,00	142,50	102,74
ЭП4Д-21-29	20,00	10,00	1 425,00	102,74
ЭП4Д-21-30	25,00	1,00	1 979,17	82,19
ЭП4Д-21-31	25,00	0,72	3 958,33	82,19
ЭП4Д-21-32	22,00	0,36	3 958,33	93,40

Продолжение табл. П1.2

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>		<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_8</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного (продольного)</i>	<i>Радиального (поперечного)</i>
ЭП4Д-21-33	25,00	0,36	3 958,33	82,19
ЭП4Д-21-34	27,00	0,36	1 425,00	76,10
ЭП4Д-21-35	30,00	1,00	3 562,50	68,49
ЭП4Д-21-36	10,00	0,40	3 562,50	205,48
ЭП4Д-21-39	15,00	0,40	2 850,00	136,99
ЭП4Д-21-40	18,00	0,50	1 979,17	114,16
ЭП4Д-21-41	34,00	0,72	989,58	60,44
ЭП4Д-21-42	34,00	1,44	712,50	60,44
ЭП4Д-21-43	4,00	2,00	2 850,00	513,70
ЭП4Д-21-44	5,00	0,50	1 900,00	410,96
ЭП4Д-21-45	6,00	0,75	712,50	342,47
ЭП4Д-21-46	6,00	2,00	712,50	342,47
ЭП4Д-21-47	8,00	2,00	356,25	256,85
ЭП4Д-21-48	8,00	4,00	285,00	256,85
ЭП4Д-21-49	8,00	5,00	118,75	256,85
ЭП4Д-21-50	10,00	12,00	118,75	205,48
ЭП4Д-21-51	10,00	12,00	1 781,25	205,48
ЭП4Д-21-52	12,00	0,80	1 583,33	171,23
ЭП4Д-21-53	12,00	0,90	142,50	171,23
ЭП4Д-21-54	12,00	10,00	712,50	171,23
ЭП4Д-21-55	16,00	2,00	1 900,00	128,42
ЭП4Д-21-56	18,00	0,75	712,50	114,16
ЭП4Д-21-57	18,00	2,00	475,00	114,16
ЭП4Д-21-58	18,00	3,00	3 958,33	114,16
ЭП4Д-21-59	20,00	0,36	1 979,17	102,74
ЭП4Д-21-60	20,00	0,72	1 900,00	102,74
ЭП4Д-21-61	20,00	0,75	1 425,00	102,74
ЭП4Д-21-62	20,00	1,00	950,00	102,74
ЭП4Д-21-63	20,00	1,50	712,50	102,74
ЭП4Д-21-64	20,00	2,00	475,00	102,74
ЭП4Д-21-65	20,00	3,00	395,83	102,74
ЭП4Д-21-66	20,00	3,60	4 750,00	102,74
ЭП4Д-21-67	27,00	0,30	913,46	76,10
ЭП4Д-21-68	30,00	1,56	142,50	68,49

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>		<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_8</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного (продольного)</i>	<i>Радиального (поперечного)</i>
ЭП4Д-21-69	30,00	10,00	3 958,33	68,49
ЭП4Д-21-70	30,00	0,36	4 318,18	68,49
ЭП4Д-21-71	41,20	0,33	791,67	49,87
ЭП4Д-21-72	50,00	1,80	2 850,00	41,10
ЭП4Д-21-73	4,00	0,50	1425,00	513,70
ЭП4Д-21-74	4,00	1,00	475,00	513,70
ЭП4Д-21-75	5,00	3,00	1 425,00	410,96
ЭП4Д-21-76	6,00	1,00	285,00	342,47
ЭП4Д-21-77	6,00	5,00	1 781,25	342,47
ЭП4Д-21-78	7,00	0,80	431,82	293,54
ЭП4Д-21-79	7,00	3,30	3 958,33	293,54
ЭП4Д-21-80	7,50	0,36	950,00	273,97
ЭП4Д-21-81	8,00	1,50	356,25	256,85
ЭП4Д-21-82	8,50	4,00	356,25	241,74
ЭП4Д-21-83	10,00	4,00	712,50	205,48
ЭП4Д-21-84	11,00	2,00	2 544,64	186,80
ЭП4Д-21-85	12,00	0,56	2 035,71	171,23
ЭП4Д-21-86	12,00	0,70	475,00	171,23
ЭП4Д-21-87	12,00	3,00	285,00	171,23
ЭП4Д-21-88	12,00	5,00	730,77	171,23
ЭП4Д-21-89	16,00	1,95	678,57	128,42
ЭП4Д-21-90	16,00	2,10	2 850,00	128,42
ЭП4Д-21-91	20,00	0,50	407,14	102,74
ЭП4Д-21-92	20,00	3,50	593,75	102,74
ЭП4Д-21-93	28,00	2,40	475,00	73,39
ЭП4Д-21-94	28,00	3,00	2 850,00	73,39
ЭП4Д-21-95	30,00	0,50	4 071,43	68,49
ЭП4Д-21-96	40,00	0,35	285,00	51,37
ЭП4Д-21-97	10,00	5,00	178,13	205,48
ЭП4Д-21-98	30,00	8,00	95,00	68,49
ЭП4Д-21-99	40,00	15,00	475,00	51,37
ЭП4Д-21-100	4,00	3,00	950,00	513,70
ЭП-9-04-Дк-001	20,00	1,50	475,00	102,74
ЭП19Д-11	66,50	3,00	1 979,17	30,90

Призмы

Обозначение	Размеры, мм			Частота резонанса, f_p , кГц	
	L_1	L_2	h	Толщинного (продольного)	Радиального (поперечного)
ЭП4К-17-1	20,00	9,00	0,72	1 979,17	75,00
ЭП4К-17-2	20,00	20,00	0,36	3 958,33	75,00
ЭП4К-17-3	20,00	20,00	0,72	1 979,17	75,00
ЭП4К-17-4	60,00	6,00	0,72	1 979,17	25,00
ЭП4К-17-5	85,00	12,00	9,50	150,00	17,65
ЭП4К-17-6	85,00	10,00	10,20	139,71	17,65
ЭП4К-17-7	80,00	7,40	5,00	285,00	18,75
ЭП4К-17-8	70,00	15,00	0,72	1 979,17	21,43
ЭП4К17-9	50,00	20,00	0,36	3 958,33	30,00
ЭП4К-17-10	50,00	20,00	0,72	1 979,17	30,00
ЭП4К-17-11	50,00	20,00	1,00	1 425,00	30,00
ЭП4К-17-12	50,00	20,00	4,50	316,67	30,00

**Перечень
пьезоэлементов из керамики ЦТБС-3**



Вид пьезоэлемента в форме кольца, диска, прямоугольной призмы и обозначение его размеров представлены на рис. П1.1 (см. Приложение 1). Пунктиром обозначены поверхности, на которые нанесены электроды.

Размерный ряд пьезоэлементов различной формы представлен в табл. П2.1 – П2.3

Таблица П2.1

Кольца

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>			<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_3</i>	<i>d_3</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП-1-20-КЦ-003	20,00	15,00	4,00	402,50	63,33
ЭП-3-19-КЦ-002	51,00	45,00	13,00	123,85	23,09
ЭП-3-20-КЦ	52,00	45,00	25,00	64,40	22,85
ЭП-3-20-КЦ-001-1	50,00	43,00	20,00	80,50	23,83
ЭП-3-20-КЦ-001-2	30,00	24,00	20,00	80,50	41,05
ЭП-3-20-КЦ-002	42,00	30,00	5,00	322,00	30,79
ЭП-3-20-КЦ-003	20,00	16,00	15,00	107,33	61,57
ЭП-3-20-КЦ-004	113,00	101,00	27,00	59,63	10,36
ЭП-3-20-КЦ-005	60,00	52,00	30,00	53,67	19,79
ЭП-3-20-КЦ-007-1	30,00	26,00	16,00	100,63	39,58
ЭП-3-20-КЦ-007-2	30,00	26,00	16,00	100,63	39,58
ЭП-3-20-Тр-001	24,00	20,00	22,00	73,18	50,38
ЭП-3-20-Тр-002	11,00	7,60	10,00	161,00	119,17
ЭП-3-20-Тр-003	11,00	7,60	6,00	268,33	119,17
ЭП-3-20-ШБ-001-1	9,00	5,00	4,00	402,50	158,33
ЭП-3-20-ШБ-001-1	20,00	10,00	5,00	322,00	73,89
ЭП-3-20-ШБ-001-3	57,00	16,00	12,00	134,17	30,36
ЭП-3-20-ШБ-003	120,00	50,00	10,00	161,00	13,04
ЭП-3-20-ШБ-004-1	28,00	13,00	6,00	268,33	54,06
ЭП-3-20-ШБ-004-2	28,00	13,00	6,00	268,33	54,06
ЭП-3-20-ШБ-005	46,00	16,00	9,00	178,89	35,75
ЭП4К-19	22,00	18,00	22,00	73,18	55,41
ЭП4К-20	30,00	19,00	18,00	89,44	45,24
ЭП19К-3	46,00	16,00	9,00	178,89	35,75
ЭП19К-13	46,00	16,00	2,00	805,00	35,75
ЭП20К-3-1	57,00	16,00	6,00	268,33	30,36
ЭП20К-3-2	46,00	16,00	6,00	268,33	35,75

Окончание табл. П2.1

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>			<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_3</i>	<i>d_3</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП20К-3-1	57,00	16,00	6,00	268,33	30,36
ЭП20К-3-2	46,00	16,00	6,00	268,33	35,75
ЭП20К-3-3	28,00	13,00	6,00	268,33	54,06
ЭП20К-4	30,00	26,00	20,00	80,50	39,58
ЭП20К-6	100,00	70,00	7,00	230,00	13,04
ЭП20К-12	12,00	6,00	3,00	536,67	123,14
ЭП20К-14	40,00	32,00	5,00	322,00	30,79
ЭП20К-15	28,00	13,00	6,00	268,33	54,06
ЭП20К-16	15,00	6,00	3,00	536,67	105,55
ЭП20К-17	46,00	16,00	6,00	268,33	35,75
ЭП20К-18	62,00	22,00	12,00	134,17	26,39
ЭП20К-18-1	28,00	23,00	10,00	161,00	43,46
ЭП20К-19	72,00	55,00	9,00	178,89	17,45
ЭП20К-20	22,00	10,00	4,80	335,42	69,27
ЭП20К-20-1	34,00	14,00	7,00	230,00	46,18
ЭП20К-20-2	28,00	22,00	6,00	268,33	44,33
ЭП20К-22	25,00	10,00	13,00	123,85	63,33
ЭП20К-23	33,00	28,00	20,00	80,50	36,34
ЭП20К-26	28,00	22,00	4,00	402,50	44,33
ЭП20К-27	52,00	47,00	25,00	64,40	22,39
ЭП20К-28	36,00	31,00	25,00	64,40	33,08
ЭП20К-29	25,00	21,40	15,00	107,33	47,77
ЭП20К-30	120,00	70,00	17,00	94,71	11,67
ЭП20К-31	100,00	70,00	7,00	230,00	13,04
ЭП20К-32	40,00	32,00	5,00	322,00	30,79
ЭП20К-34	20,00	10,00	5,00	322,00	73,89
ЭП20К-35	62,30	50,50	6,00	268,33	19,65
ЭП20К-36	120,00	104,00	7,00	230,00	9,90

Таблица П2.2

Диски

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>		<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_8</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП-3-04-Дк-003	60,00	4,70	342,55	39,73
ЭП-3-19-Дк-001	50,00	1,80	894,44	47,67

Окончание табл. П2.2

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>		<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>D_8</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП-3-20-Дк	25,00	7,00	230,00	95,34
ЭП-3-20-Дк-001	35,00	4,50	357,78	68,10
ЭП-3-20-Дк-002	10,00	5,00	322,00	238,36
ЭП-3-20-Дк-003	42,00	1,25	1 288,00	56,75
ЭП-3-20-Дк-004	20,00	1,00	1 610,00	119,18
ЭП-3-20-Дк-005	7,00	3,30	487,88	340,51
ЭП-3-20-Дк-006	30,00	8,00	201,25	79,45
ЭП-3-20-Дк-007	66,50	3,00	536,67	35,84
ЭП-3-20-Дк-016	13,00	3,00	536,67	183,35
ЭП-3-20-Ст-001	16,00	10,00	161,00	148,97
ЭП-3-20-Ст-002	16,00	18,00	89,44	148,97
ЭП-3-20-Ст-003	7,00	9,80	164,29	340,51
ЭП-3-20-Ст-004	6,00	4,00	402,50	397,26
ЭП-3-20-Ст-004-2	5,00	4,50	357,78	476,71
ЭП-3-20-Ст-004-3	7,00	4,00	402,50	340,51
ЭП-3-20-Ст-005	12,00	10,00	161,00	198,63
ЭП4Д-18	50,00	1,80	894,44	47,67
ЭП19Д-2	7,00	8,90	180,90	340,51
ЭП19Д-10	30,00	13,00	123,85	79,45
ЭП19Д-11	66,50	3,00	536,67	35,84
ЭП20Д-8	25,00	13,00	123,85	95,34
ЭП20Д-9	12,00	1,30	1 238,46	198,63
ЭП20Д-10	50,00	1,20	1 341,67	47,67
ЭП20Д-14	30,00	10,00	161,00	79,45
ЭП20Д-17	30,00	1,00	1610,00	79,45

Таблица П2.3

Призмы

<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>			<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>L_1</i>	<i>L_2</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП-3-20-Бр-001	100,00	30,00	10,00	161,00	17,40
ЭП-3-20-Бр-002	12,00	12,00	6,00	268,33	145,00
ЭП-3-20-Бр-003	50,00	6,00	7,00	230,00	34,80

Продолжение табл. П2.3

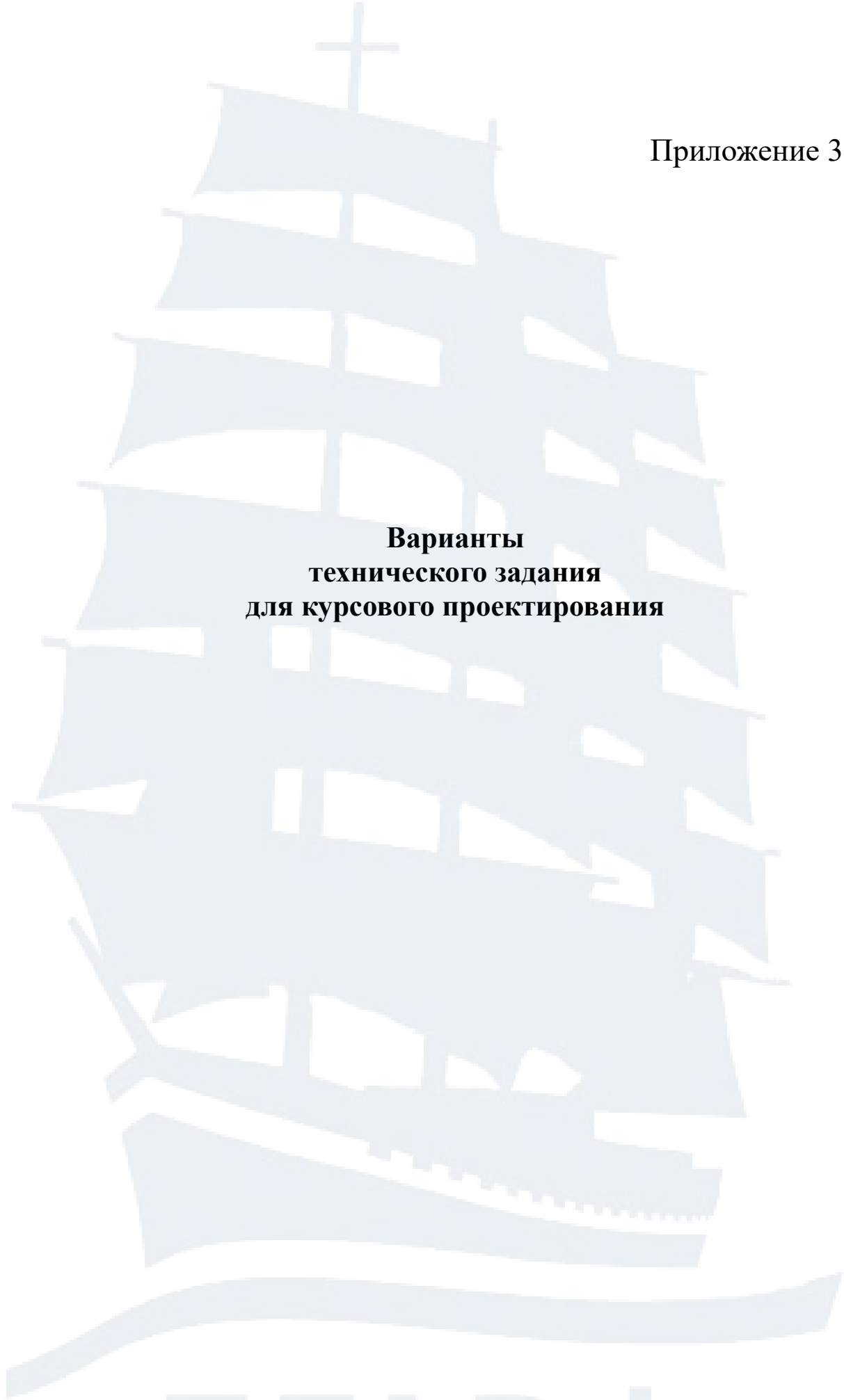
<i>Обозначение</i>	<i>Размеры, мм</i>			<i>Частота резонанса, f_p, кГц</i>	
	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>h</i>	<i>Толщинного</i>	<i>Радиального</i>
ЭП-3-20-Бр-004	12,00	8,50	6,00	268,33	145,00
ЭП-3-20-Бр-011-1	10,00	6,00	6,00	268,33	174,00
ЭП-3-20-Бр-011-2	6,00	6,00	8,70	185,06	290,00
ЭП-3-20-Бр-011-3	6,00	6,00	8,00	201,25	290,00
ЭП-3-20-Пл-001	35,00	15,00	1,30	1 238,46	49,71
ЭП-3-20-Пл-002	120,00	30,00	3,00	536,67	14,50
ЭП19Б-4	29,30	15,00	10,00	161,00	59,39
ЭП20Б-20	10,50	8,50	8,50	189,41	165,71
ЭП20Б-21	35,00	15,00	10,00	161,00	49,71
ЭП20Б-27	24,00	10,00	6,00	268,33	72,50
ЭП20Б-29	85,00	8,50	8,70	0,04	20,47
ЭП20Б-29-1	70,00	8,00	10,00	161,00	24,86
ЭП20Б-30	100,00	21,00	7,00	230,00	17,40
ЭП20Б-31	80,00	10,00	10,00	161,00	21,75
ЭП20Б-45	44,00	18,00	16,00	100,63	39,55
ЭП20Б-46	22,50	8,50	8,50	189,41	77,33
ЭП20Б-47	21,00	8,50	8,50	189,41	82,86
ЭП20Б-48	35,50	14,00	7,00	230,00	49,01
ЭП20Б-49	80,00	7,20	5,00	322,00	21,75
ЭП20Б-53	34,00	7,00	6,00	268,33	51,18
ЭП20Б-57	48,00	12,00	8,50	189,41	36,25
ЭП20Б-58	36,00	12,00	8,50	189,41	48,33
ЭП20Б-59	30,00	3,80	3,00	536,67	58,00
ЭП20Б-60	30,00	3,10	2,90	555,17	58,00
ЭП20П-2	130,00	37,00	3,50	460,00	13,38
ЭП20П-3	80,00	37,00	3,50	460,00	21,75
ЭП20П-6	100,00	26,00	8,00	201,25	17,40
ЭП20П-6-1	30,00	3,50	4,40	365,91	58,00
ЭП20П-6-2	30,00	3,50	4,80	335,42	58,00
ЭП20П-14	9,60	9,60	12,00	134,17	181,25
ЭП20П-15	100,00	18,00	9,80	164,29	17,40
ЭП20П-16	120,00	50,00	10,00	161,00	14,50
ЭП-1-20-БрТ-012	100,00	10,00	$9,80 \times L2^\circ$	164,29	17,40
ЭП-3-19-БрТ-001	60,00	6,00	$8,00 \times L4^\circ$	201,25	29,00
ЭП-3-19-БрТ-002	90,00	5,00	$8,00 \times L5^\circ$	201,25	19,33
ЭП-3-20-БрТ-001	80,00	15,00	$10,00 \times L4^\circ$	161,00	21,75

Окончание табл. П2.3

Обозначение	Размеры, мм			Частота резонанса, f_p , кГц	
	L_1	L_2	h	Толщинного	Радиального
ЭП-3-20-БрТ-002	25,40	6,00	$6,50 \times L15^\circ$	247,69	68,50
ЭП-3-20-БрТ-004	100,00	30,00	$10,70 \times L1^\circ 12'$	150,47	17,40
ЭП-3-20-БрТ-005	100,00	30,00	$10,40 \times L1^\circ 12'$	154,81	17,40
ЭП-3-20-БрТ-006	100,00	30,00	$9,80 \times L1^\circ 12'$	164,29	17,40
ЭП-3-20-БрТ-002	25,40	6,00	$6,50 \times L15^\circ$	247,69	68,50
ЭП-3-20-БрТ-004	100,00	30,00	$10,70 \times L1^\circ 12'$	150,47	17,40
ЭП-3-20-БрТ-005	100,00	30,00	$10,40 \times L1^\circ 12'$	154,81	17,40
ЭП-3-20-БрТ-006	100,00	30,00	$9,80 \times L1^\circ 12'$	164,29	17,40
ЭП-3-20-БрТ-007	80,00	12,00	$10,00 \times L1^\circ 12'$	161,00	21,75
ЭП-3-20-БрТ-007	80,00	12,00	$10,00 \times L1^\circ 12'$	161,00	21,75
ЭП-3-20-БрТ-008	80,00	15,00	$12,4 \times L1^\circ 12'$	129,84	21,75
ЭП-3-20-БрТ-008-1	56,00	11,60	$7,0 \times L7^\circ 30'$	230,00	31,07
ЭП-3-20-БрТ-008-2	50,00	10,00	$6,30 \times L7^\circ 30'$	255,56	34,80
ЭП-3-20-БрТ-009	100,00	18,00	$9,80 \times L11^\circ$	164,29	17,40
ЭП-3-20-БрТ-010	45,00	45,00	$5,50 \times L11^\circ$	292,73	38,67
ЭП19Б-11	90,00	8,00	$9,70 \times L4^\circ$	165,98	19,33
ЭП19Б-12	80,00	6,50	$7,30 \times L7^\circ 30'$	220,55	21,75
ЭП20Б-6	40,00	5,00	$9,50 \times L15^\circ$	169,47	43,50
ЭП20Б-8	50,00	9,40	$9,70 \times L7^\circ 30'$	165,98	34,80
ЭП20Б-10	101,00	14,30	$11,40 \times L6^\circ$	141,23	17,23
ЭП20Б-12	80,00	10,00	$9,70 \times L3^\circ 36'$	165,98	21,75
ЭП20Б-14	70,40	9,00	$9,80 \times L7^\circ 12'$	164,29	24,72
ЭП20Б-15	50,00	5,00	$5,50 \times L4^\circ 30'$	292,73	34,80
ЭП20Б-26	80,00	8,00	$8,30 \times L4^\circ$	193,98	21,75
ЭП20Б-28	68,00	18,00	$9,80 \times L4^\circ$	164,29	25,59
ЭП20Б-32	50,00	9,00	$5,50 \times L2^\circ 30'$	292,73	38,67
ЭП20Б-34	100,00	20,00	$10,00 \times L2^\circ$	161,00	21,75
ЭП20Б-35	40,00	10,00	$7,30 \times L4^\circ$	220,55	21,75
ЭП20Б-41	70,40	14,00	$7,60 \times L5^\circ$	211,84	24,72

Примечание. В табл. П2.3 в столбце 4 символом «L» обозначен угол скоса боковой поверхности бруска (БрТ) с тангенциальной поляризацией [12].

**Варианты
технического задания
для курсового проектирования**



В настоящем приложении представлены варианты технического задания для курсового проектирования гидроакустических каналов рыбопромысловых приборов двух типов – судовых гидролокаторов и эхолотов (бортового оборудования) и траловых зондов (тралового оборудования). Специфика проектирования каждого типа описана в основной части пособия.

Для расчета параметров канала, в том числе гидроакустической антенны, требуются исходные данные, необходимый объем которых представлен в табл. ПЗ.1 и ПЗ.2. Эти исходные данные можно разделить на три группы, представленные ниже:

- 1) параметры приемо-излучающего тракта прибора:
 - чувствительность приемного тракта (исключая антенну), U_{min} ;
 - ширина характеристики направленности антенны (на уровне -3дБ), 2θ ;
 - рабочая частота, f_p ;
 - ширина частотной характеристики чувствительности приемного тракта (на уровне -3дБ), Δf ;
 - акустическое давление на оси антенны на расстоянии 1 м от излучающей поверхности, $P_{1м}$;
 - разрешающая способность по дальности, Δr ;
 - вероятности правильного обнаружения $P_{по}$ и ложной тревоги $P_{лт}$;
- 2) параметры рабочей среды:
 - скорость звука в воде, c_0 ;
 - плотность воды, ρ_0 ;
- 3) параметры целей:
 - дальность обнаружения i -й цели, r_i ;
 - радиус эквивалентной сферы сосредоточенной цели, $R_э$;
 - коэффициент отражения от грунта (по давлению) μ .

В исходных данных также указан тип судна-носителя, на основании чего определяется уровень шумовой помехи.

Таблица ПЗ.1

Судовые гидролокаторы, эхолоты

№ п/п	Рабочая частота f_p , кГц	Дистанция локации r , м	$R_{1м}, Па$	Цель	2θ , градус	Параметры обнаружения			Разрешение по дальности Δr , м	Судно – носитель
						δ	$P_{по}$	$P_{лт}$		
1		3 000		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	40×20		0,95	0,01	1,5	КТ, СТ
		800								
		200								
2		3 500		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	40 20	2,0			1,0	КТ, СТ
		850								
		250								
3		1 500		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	16×10		0,92	0,01	0,8	КТ, СТ
		560								
		160								
4		2 000		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	16 10	2,5			0,6	КТ, СТ
		600								
		180								
5		1 000		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	15×7		0,9	0,02	0,5	СТ, МТ
		500								
		150								
6		1 200		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0M$ $R_3 = 0,1M$	15 7	3,0			0,4	СТ, МТ
		550								
		150								

Продолжение табл. ПЗ.1

№ п/п	Рабочая частота f_p , кГц	Дистанция локации r , м	$P_{1, \text{мб}}$ Па	Цель	2θ , градус	Параметры обнаружения			Разрешение по дальности Δr , м	Судно – – носитель
						δ	$P_{\text{по}}$	$P_{\text{лт}}$		
7	20		$5,5 \times 10^4$	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	35×15		0,92	0,015	1,0	СТ, МТ
8	25		5×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	30×15		0,9	0,015	1,5	КТ, СТ
9	30		$8,5 \times 10^4$	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	25 10	2,0			0,8	КТ, СТ
10	35		9×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	20 8		0,92	0,01	0,6	КТ, СТ
11	40		9×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	18 7	3,0			0,4	СТ, МТ
12	110		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	14 7		0,9	0,015	0,15	СТ, МТ
13	140		$1,5 \times 10^4$	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 2,0\text{М}$ $R_3 = 0,1\text{М}$	12 6	3,0			0,1	СТ, МТ

Условные обозначения в таблице: Γp – грунт с коэффициентом отражения по давлению μ ; R_3 – радиус эквивалентной сферы сосредоточенной цели; МТ – судно малого тоннажа, СТ – судно среднего тоннажа, КТ – судно крупного тоннажа.

Таблица ПЗ.2

№ п/п	Частота f_p кГц	Дистанция локации r , м	$R_{\Gamma m}$, Па	Цель	Ширина ХН 2θ , градус	Параметры обнаружения			Разрешение по дальности Δr , м
						δ	$P_{по}$	$P_{лт}$	
1	20	1200 150 80		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1M$ НП $\mu_{нп} = 0,8$	40×30	3,0			0,7
2	25		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1M$ НП $\mu_{нп} = 0,8$	40		0,95	0,01	0,7
3		1300 160 100		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1M$ НП $\mu_{нп} = 0,8$	35		0,94	0,012	0,7
4	35		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1M$ НП $\mu_{нп} = 0,8$	30		0,93	0,014	0,6

Продолжение табл. ПЗ.2

№ n/n	Частота f_p , кГц	Дистанция локации r , м	$P_{L_{\text{мс}}}$, Па	Цель	Ширина ХН 2θ , градус	Параметры обнаружения			Разрешение по дальности Δr , м
						δ	$P_{\text{по}}$	$P_{\text{лт}}$	
5	40	800 120 60		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	30		0,92	0,015	0,6
6	45		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	25		0,91	0,015	0,6
7	50		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	25		0,9	0,017	0,5
8	60		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	20		0,9	0,02	0,5
9	65	800 120 50		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	15		0,9	0,018	0,5
10	70		3×10^4	$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	15		0,9	0,016	0,45
11	75	700 100 50		$\Gamma p \mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{M}$ $\text{НП} \mu_{\text{н}} = 0,8$	12		0,9	0,019	0,45

Окончание табл. ПЗ.2

№ n/n	Частота f_p кГц	Дистанция локации r , м	$R_{L\text{м}}$, Па	Цель	Ширина ХН 2θ , градус	Параметры обнаружения			Разрешение по дальности Δr , м
						δ	$R_{\text{по}}$	$R_{\text{лт}}$	
12	85		3×10^4	Гр $\mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{м}$ НП $\mu_{\text{лт}} = 0,8$	12		0,9	0,022	0,4
13	100	400 80 50		Гр $\mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{м}$ НП $\mu_{\text{лт}} = 0,8$	10×25	2,5			0,3
14	120	400 70 50		Гр $\mu = 0,3$ $R_3 = 0,1\text{м}$ НП $\mu_{\text{лт}} = 0,8$	8×20	2,0			0,3

Обозначения в таблице: ХН – характеристика направленности антенны; Гр – грунт с коэффициентом отражения по давлению μ ; R_3 – радиус эквивалентной сферы сосредоточенной цели; НП – нижняя подбора трала – металлический трос радиусом $R_{\text{п}} = 2,5$ см и коэффициентом отражения (по давлению) $\mu_{\text{лт}}$.

В курсовом проекте необходимо рассчитать:

- 1) дистанцию локации заданных целей, если задана частота и давление на расстоянии 1 м от антенны;
- 2) акустическую мощность, необходимую для локации заданных целей на заданном расстоянии;
- 3) исходя из значения удельной акустической мощности, выбрать и рассчитать конструкцию электроакустического преобразователя;
- 4) выполнить эскиз конструкции преобразователя;
- 5) выполнить эскиз компоновки (упаковки) преобразователей по активной поверхности антенны;
- 6) выполнить расчет электроакустических параметров преобразователя и антенны в целом и представить результаты в виде сводной таблицы;
- 7) построить характеристики направленности антенны в двух плоскостях и сравнить полученные значения ширины основного лепестка на уровне -3 дБ.

Порядок выполнения расчетов (рекомендации)

Расчеты целесообразно начинать с антенны, поскольку ее параметры определяют энергетические возможности проектируемого тракта локации.

Прежде всего необходимо оценить указанные в техническом задании параметры гидроакустического канала, влияющие на выбор конструктивного оформления антенны. При этом возможны указанные ниже варианты расчета.

Судовые гидролокаторы и эхолоты. Вариант А

Заданы:

- дистанция локации целей различного характера r_i ;
- ширина характеристики направленности антенны 2θ ;
- коэффициент распознавания сигнала δ (либо в явной форме, либо через вероятностные параметры обнаружения $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$);
- разрешение по дальности Δr ;
- тип судна-носителя.

Алгоритм расчетов в этом случае следующий:

- 1) по заданной дистанции локации грунта определяется оптимальная рабочая частота f_p по формуле (46);

2) по заданной характеристике направленности 2θ определяются размеры рабочей поверхности антенны a , b или d по формулам (64, 65) и ее площадь (66, 67). Если ширина характеристики направленности задана в виде $2\theta_1 \times 2\theta_2$, следует иметь в виду, что активная поверхность антенны имеет форму прямоугольника. Если же этот параметр задан в виде двух значений $2\theta_1$, $2\theta_2$, это следует понимать, как переключаемую характеристику направленности антенны в форме диска. Таким образом, должна обеспечиваться возможность переключения ширины ХН антенны коммутацией ее выводов. В этом случае фактически расчету подлежат две антенны;

3) рассчитывается площадь поверхности антенны S по формулам (66, 67), полагая $N = 1$. Полагая, что коэффициент заполнения преобразователями полученной площади равен $\eta = 0,8$, определяем активную площадь рабочей поверхности антенны $S_a = \eta \cdot S$;

4) определяется коэффициент осевой концентрации антенны по формуле (57);

5) по заданному типу судна-носителя выбирается приведенное значение шумовой помехи $P_{ш0}$. Если указано несколько типов носителей, то выбирается наибольшее значение $P_{ш0}$. Затем по формуле (52) определяют величину шумовой помехи в точке приема $P_{ш}$, полагая ширину частотной полосы чувствительности приемного тракта $\Delta f = 0,05 f_p$.

6) если коэффициент распознавания δ задан в явной форме, то пороговое значение сигнала P_0 на входе антенны определяется по формуле (51). Если заданы вероятности F и D , то прежде необходимо по (54) вычислить δ , а затем по (51) – P_0 ;

7) по формулам (55) или (56) вычисляется коэффициент километрического затухания звука в воде β ;

8) по формулам (48-50) определяются значения акустической мощности W_r , W_n и W_p , необходимые для локации указанных в задании целей на заданных дистанциях. Наибольшее из полученных значений мощности W_{max} берется за основу для дальнейших расчетов. По формуле (70) рассчитывается значение удельной акустической мощности W_{ay} . При этом принимается $S = S_a$ и $W = W_{max}$. Полученное значение W_{ay} должно удовлетворять требованиям механической прочности преобразователей антенны, которые изложены в подразделе 2.2, т. е. должно выполняться условие $W_{ay} \leq W_{ay. доп}$. При этом допустимое значение акустической мощности определяется как $W_{доп} = S \cdot W_{ay. доп} = W_{max}$;

9) используя формулу (69), по заданному значению разрешающей способности по дальности Δr определяется длительность излучаемого импульса τ ;

10) для судовых приборов (эхолотов и гидролокаторов) по табл. 4 определяется кавитационный порог $W_{ук}$ для излучаемой мощности при заданных условиях. При этом считать, что антенна располагается у морской поверхности. Полученное значение сравнивается с $W_{ау}$. Если условие (70) выполняется, то за основу в дальнейших расчетах принимается значение W , полученное выше. Если условие (70) не выполняется, то в качестве расчетного значения принимается допустимая величина акустической мощности $W_{доп} = S_a \cdot W_{ук}$, а в пояснительной записке дается этому обоснование;

11) используя формулы (48, 50), как уравнения относительно дистанции локации r с заданным значением $W_{доп}$ в левой части, рассчитываются предельные значения дальностей локации соответствующих целей, для которых расчетное значение необходимой мощности (см. пункт 9) превышает допустимое значение $W_{доп}$;

12) на основании полученного в п. 9 и 10 максимального допустимого значения удельной акустической мощности выбирается конструктивное исполнение преобразователя антенны. При этом необходимо руководствоваться рекомендациями подраздела 2.2. «Выбор конструкции электроакустического преобразователя»;

13) разработка конструкции преобразователя (выбор пьезоэлемента, материалов частотопонижающих накладок, армирующего болта и др.) производится согласно рекомендациям подраздела 6.1;

14) расчет геометрических размеров элементов преобразователя и его электроакустических характеристик производится согласно методике, изложенной в подразделах 2.3, 2.4 и 2.5;

15) размещение преобразователей (упаковка) по поверхности антенны выполняется согласно рекомендациям подраздела 6.2;

16) расчет характеристики направленности антенны (в двух взаимно перпендикулярных плоскостях) производится, руководствуясь рекомендациями раздела 4 и подраздела 6.2. Результаты расчета проверяются на соответствие техническому заданию на проект.

Судовые гидролокаторы и эхолоты. Вариант Б

Заданы:

- рабочая частота прибора f_p ;
- амплитуда звукового давления $P_{1м}$ на акустической оси антенны, приведённая к расстоянию 1 м;

- ширина характеристики направленности антенны 2θ ;
- коэффициент распознавания сигнала δ (либо в явной форме, либо через вероятностные параметры обнаружения $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$);
- разрешение по дальности Δr ;
- тип судна-носителя.

Алгоритм расчетов в этом случае следующий:

- 1) путем решения уравнения (72) относительно излучаемой мощности W , определяется ее значение при заданном $P_{1\text{м}}$;
- 2) дальнейшие расчеты проводятся по алгоритму, изложенному в пунктах 2-7 предыдущего варианта А4;
- 3) по формуле (70) рассчитывается значение удельной акустической мощности $W_{\text{ау}}$. При этом принимается $S = S_a$ и W , рассчитанное в п. 1 варианта Б. Если полученное значение $W_{\text{ау}}$ удовлетворяет требованиям механической прочности преобразователей антенны, которые изложены в подразделе 2.2, то за основу для дальнейших расчетов принимается рассчитанное выше значение мощности W . В противном случае в качестве расчетной принимается величина $W = W_{\text{доп}} = S_a \cdot W_{\text{ау. доп}}$;
- 4) полученное значение мощности $W_{\text{доп}}$ должно удовлетворять требованию отсутствия кавитации (смотри п. 9 и 10 варианта А);
- 5) используя формулы (48, 50), как уравнения относительно дистанции локации r_i (где i принимает значения г, р) с заданным значением $W_{\text{доп}}$ в левой части, проводится расчет величин дальности локации соответствующих целей;
- 6) дальнейшие расчеты проводятся по алгоритму, изложенному в п. 12-16 варианта А.

Траловые зонды. Вариант В

Заданы:

- рабочая частота прибора f_p ;
- амплитуда звукового давления $P_{1\text{м}}$ на акустической оси антенны, приведённая к расстоянию 1м;
- ширина характеристики направленности антенны 2θ ;
- коэффициент распознавания сигнала δ (либо в явной форме, либо через вероятностные параметры обнаружения $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$);
- разрешение по дальности Δr ;
- тип судна-носителя.

Алгоритм расчетов в этом случае следующий:

- 1) путем решения уравнения (72) относительно излучаемой мощности W , определяется ее значение при заданном $P_{1\text{м}}$;

2) дальнейшие расчеты проводятся по алгоритму, изложенному в пунктах 2-4 варианта А;

3) при определении порогового значения сигнала на входе антенны для тралового зонда необходимо руководствоваться рекомендациями, изложенными в подразделе 3.3 в формулах (52, 53, 54) настоящего пособия. При этом чувствительность приемного тракта прибора принимается равной $U_{min} = 5$ мкВ;

4) дальнейшие расчеты проводятся по алгоритму, изложенному в пунктах 6-8 варианта А;

5) по формуле (70) рассчитывается значение удельной акустической мощности W_{ay} . При этом принимается $S = S_a$ и W , рассчитанное в п. 1 варианта Б. Если полученное значение W_{ay} удовлетворяет требованиям механической прочности преобразователей антенны, которые изложены в подразделе 2.2, то за основу для дальнейших расчетов принимается рассчитанное выше значение мощности W . В противном случае в качестве расчетной принимается величина $W = W_{доп} = S_a \cdot W_{ay, доп}$.

Порог кавитации не рассчитывается, поскольку на глубинах более 10 м явление кавитации не учитывается;

6) используя формулы (48-50) как уравнения относительно дистанции локации r_i (где i принимает значения г, п, р) с заданным значением $W_{доп}$ в левой части, проводится расчет величин дальности локации соответствующих целей;

7) дальнейшие расчеты проводятся по алгоритму, изложенному в п. 12-16 варианта А.

Траловые зонды. Вариант Г

Заданы:

- рабочая частота станции f_p ;
- дистанция локации целей различного характера r_i ;
- ширина характеристики направленности антенны 2θ ;
- коэффициент распознавания сигнала δ (либо в явной форме, либо через вероятностные параметры обнаружения $P_{по}$ и $P_{лт}$);
- разрешение по дальности Δr .

Алгоритм расчетов в этом случае аналогичен алгоритму варианта А за исключением пунктов, изложенных ниже:

- п. 1 исключается, поскольку рабочая частота задана;
- п. 5 выполняется в редакции варианта В;
- п. 10 из рассмотрения исключается, поскольку на глубинах более 10 м явление кавитации не учитывается.

Траловые зонды. Вариант Д

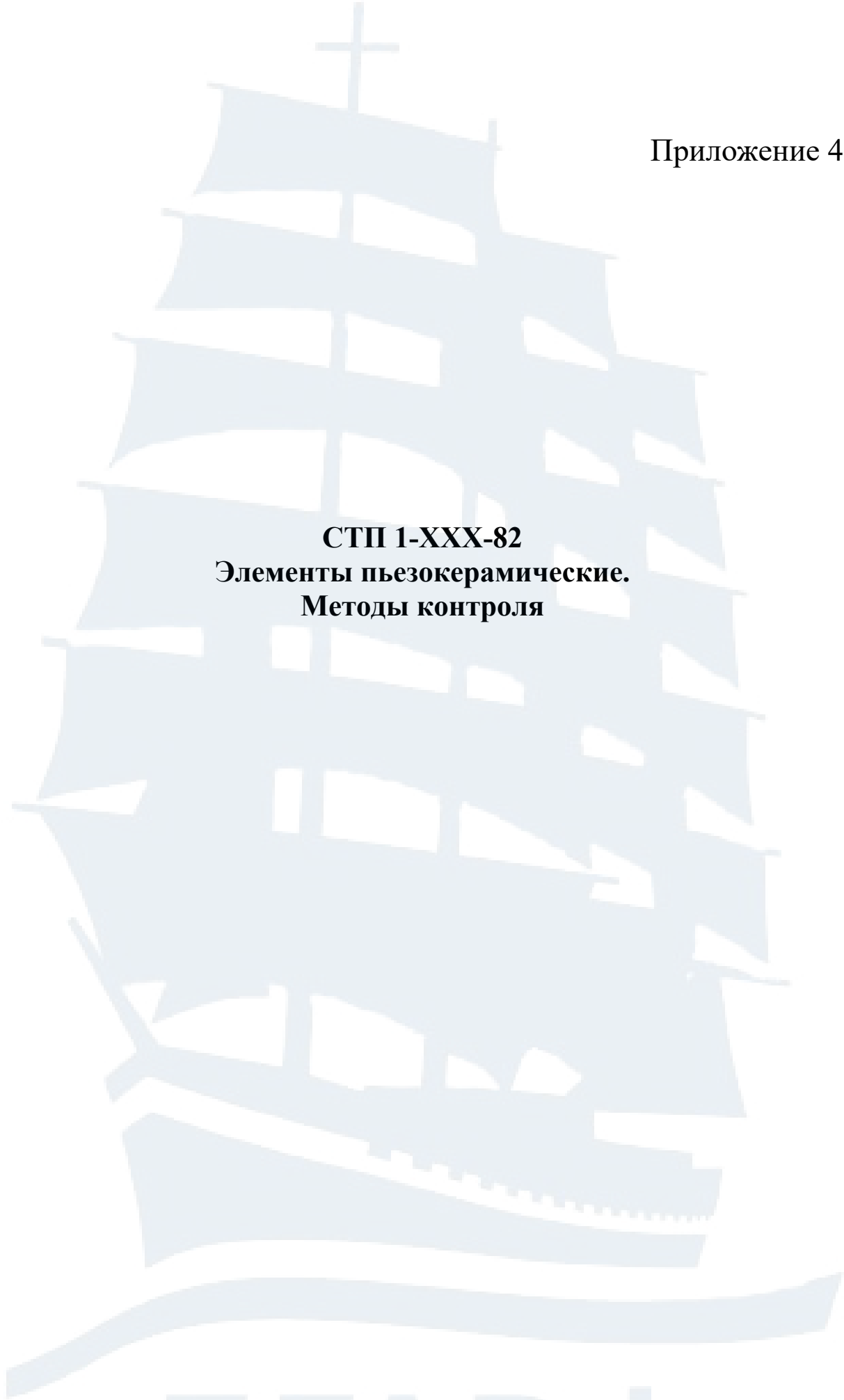
Заданы:

- дистанция локации целей различного характера r_i ;
- ширина характеристики направленности антенны 2θ ;
- коэффициент распознавания сигнала δ (либо в явной форме, либо через вероятностные параметры обнаружения $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$);
- разрешение по дальности Δr .

Алгоритм расчетов в этом случае аналогичен алгоритму варианта А за исключением пунктов, изложенных ниже;

- п. 5 выполняется в редакции варианта В;
- п. 10 из рассмотрения исключается, поскольку на глубинах более 10 м явление кавитации не учитывается.

СТП 1-XXX-82
Элементы пьезокерамические.
Методы контроля



1. Технические требования

1.1. Пьезоэлементы должны быть изготовлены в соответствии с требованиями технических условий, утвержденных в установленном порядке, и должны пройти ОТК завода-изготовителя.

1.2. Требования к внешнему виду пьезоэлемента.

1.2.1. Вырывы, сколы и поры на поверхностях пьезоэлемента не допускаются. Определения этих дефектов приведены в справочном Приложении 4.1.

1.2.2. Нарушение металлического покрытия пьезоэлемента, шелушение и просветы не допускаются. Определения этих дефектов приведены в справочном Приложении 4.1.

1.2.3. Обязательно наличие маркировки полярности на поверхности пьезоэлемента.

1.3. Требования к электрофизическим параметрам

1.3.1. Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых электрических полях $\operatorname{tg}\delta$ должен соответствовать требованиям технических условий на пьезоэлемент, указанным в справочном Приложении 4.2. Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ должна соответствовать требованиям технических условий на пьезоэлемент (см. справочное Приложение 4.2).

1.3.2. Скорость звука C_1^E и C_3^D должна соответствовать требованиям технических условий на пьезоэлемент (см. справочное Приложение 4.2). Пьезомодули d_{31} и d_{33} в динамическом режиме должны соответствовать требованиям технических условий на пьезоэлемент (см. справочное Приложение 4.2).

2. Метод отбора пьезоэлементов для контроля

Контролю подвергаются все пьезоэлементы, полученные от изготовителя.

3. Аппаратура для проведения контроля

3.1. Средства измерения, применяемые при контроле, приведены в рекомендуемом Приложении 4.3.

3.2. Разрешается применять другие средства измерения, обеспечивающие требуемую настоящим стандартом точность измерения.

4. Подготовка к проведению контроля

4.1. Все виды контроля пьезоэлементов должны проводиться при температуре $(296 \pm 5)^\circ \text{K}$, относительной влажности $(65 \pm 15) \%$ и атмосферном давлении $(10^5 \pm 4 \cdot 10^3) \text{Па}$.

4.2. Перед началом контроля пьезоэлемент выдерживают в условиях, указанных в п. 4.1, не менее 2 часов.

5. Методы контроля

5.1. Контроль на соответствие требованиям к внешнему виду пьезоэлементов

5.1.1. Наличие поверхностных дефектов пьезоэлементов (п. 1.2.1) проверяют визуально.

5.1.2. Нарушение металлического покрытия, шелушение и просвет покрытия (п. 1.2.2) определяют визуально.

5.1.3. Наличие метки знака полярности (п. 1.2.3) определяются визуально.

5.2. Контроль электрофизических параметров

5.2.1. Величину резонансной f_p и антирезонансной f_a частот измеряют на установке, функциональная схема которой представлена на рис. П4.1.

Пьезоэлемент подключают к измерительному четырехполюснику. С генератора стандартных сигналов на вход четырехполюсника подают сигнал такой величины, чтобы на сопротивлении напряжение составляло 500 мВ. Это напряжение контролируют с помощью милливольтметра 3 в течение всего времени измерения.

Переключатель «П» ставят в положение «замкнуто». Плавным изменением частоты генератора добиваются максимального отклонения стрелки на милливольтметре 5. Этому максимуму соответствует резонансная частота испытуемого пьезоэлемента, которая контролируется частотомером 2.

Величину напряжений, возникающих при резонансе U_p и антирезонансе U_a , отсчитывают по милливольтметру 5 на частотах резонанса и антирезонанса соответственно.

5.2.2. Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях $\text{tg} \delta$ (п. 1.3.1) измеряют с помощью универсального моста или другого прибора, обеспечивающего погрешность измерения не более

$\pm(0,1 \cdot \text{tg} \delta + 0,005)$. Измерения производят на частоте $(1\,000 \pm 200)$ Гц и напряжении не более 25 В.

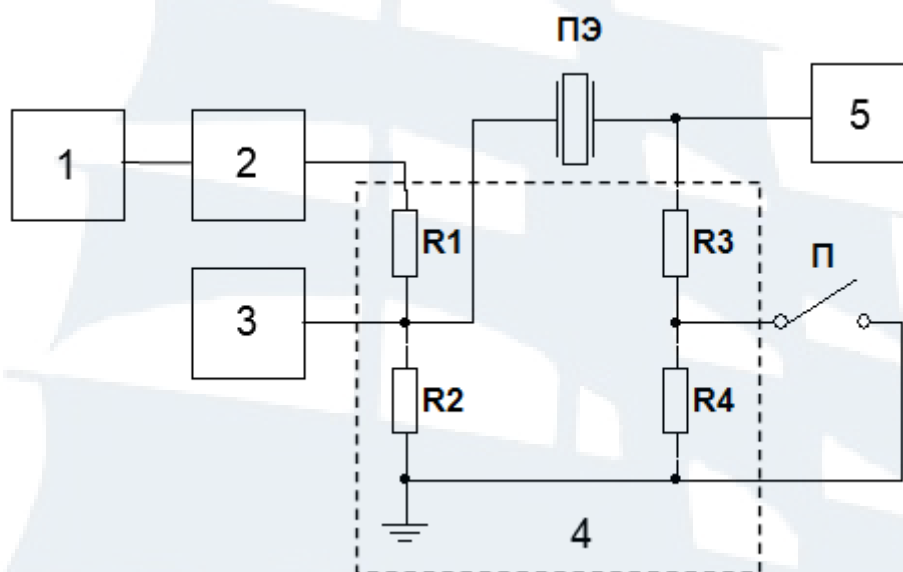


Рис. П4.1. Функциональная схема измерительной установки для определения резонансной f_0 и антирезонансной f_a частот пьезоэлементов:

- 1 – генератор стандартных сигналов с $R_{\text{вых}} = (5 \div 100)$ Ом;
 2 – электронный частотомер с точностью измерения $\pm 5 \cdot 10^{-6} \pm 1$ счет;
 3 – милливольтметр с пределами измерения до 1 000 мВ; 4 – пассивный четырехполюсник, где $R_1 + R_2 = R_{\text{вых. генератора}}$; $R_2 = (0,05 \div 0,1)$,
 $R_1 \leq 0,1 \cdot R_{K \text{ min}}$, $R_3 = (0,05 \div 0,1) \cdot R_{K \text{ min}}$, $R_4 = (100 \div 200) \cdot R_3$;
 $R_{K \text{ min}}$ – сопротивление измеряемого пьезоэлемента на последовательном резонансе; 5 – милливольтметр с пределами измерения 1 000 мВ;
 ПЭ – испытуемый пьезоэлемент; П – переключатель

5.2.3. Относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ определяют расчетным путем по формулам табл. П4.1, исходя из статистической емкости пьезоэлемента C_0 .

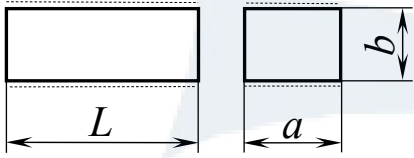
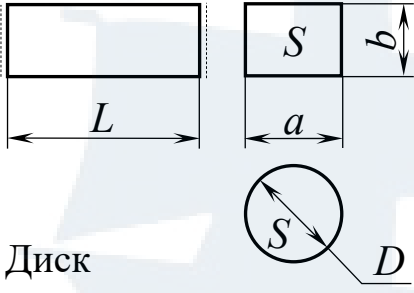
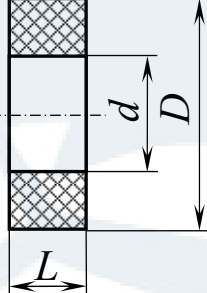
Статическую емкость C_0 пьезоэлемента измеряют с помощью универсального моста или другого прибора, обеспечивающего погрешность измерения не более 3 %. Измерение производят на частотах $(1\,000 \pm 200)$ Гц и напряжении не более 25 В.

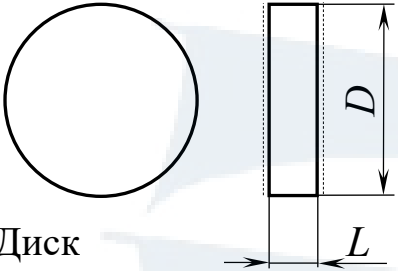
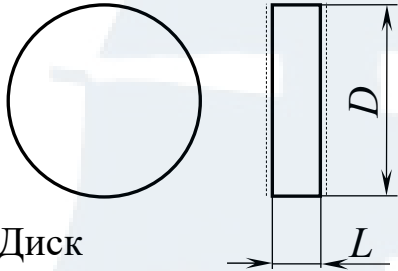
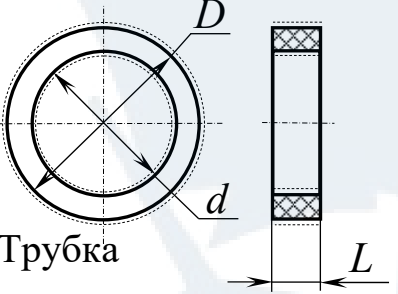
Электрическая емкость соединительных проводов должна быть не более 5 % от статической емкости пьезоэлемента.

5.2.4. Скорость звука c_1^E и c_3^D пьезоэлементов (п. 1.3.3) определяют по формулам, приведенным в табл. П4.1.

Таблица П4.1

Формулы для расчета электрофизических параметров пьезоэлементов

Форма пьезоэлемента, наименование	Расчетные формулы	Номер примечания
 <p>Пластина</p>	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 113 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0 \cdot b}{L \cdot a} ;$ $c_1^E = 2 \cdot L \cdot f_p ;$ $d_{31} = 2,34 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\epsilon_0 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_p^3}}$	1, 3
 <p>Диск</p>	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 113 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0 \cdot b}{S} ;$ $c_1^D = 2 \cdot L \cdot f_p ;$ $d_{33} = 2,34 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\epsilon_0 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot f_p^3}}$	1, 3
 <p>Шайба</p>	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 143,9 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0 \cdot L}{D^2 - d^2} ;$ $c_1^E = \frac{1,57}{t} \cdot (D + d) \cdot f_p ;$ $d_{31} = 2,68 \cdot 10^{-6} \cdot \eta \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\epsilon_0 \cdot \rho \cdot f_p^3 \cdot (D + d)^2}}$	2, 4, 5, 6

Форма пьезоэлемента, наименование	Расчетные формулы	Номер приме- чания
 <p>Диск</p>	$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 143,9 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0 \cdot L}{D^2};$ $c_1^E = 143,9 \cdot D \cdot f_p;$ $d_{31} = 1,91 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\varepsilon_0 \cdot \rho \cdot f_p^3 \cdot D^2}}$	1, 3
 <p>Диск</p>	$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 143,9 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0 \cdot L}{D^2};$ $c_1^E = 143,9 \cdot D \cdot f_p;$ $d_{31} = 1,91 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\varepsilon_0 \cdot \rho \cdot f_p^3 \cdot D^2}}$	1, 3
 <p>Трубка</p>	$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 17,98 \cdot 10^9 \cdot \frac{C_0}{L} \cdot \ln \frac{D}{d};$ $c_1^E = \frac{1,57}{t} \cdot (D + d) \cdot f_p;$ $d_{31} = 2,68 \cdot 10^{-6} \cdot \eta \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T \cdot \Delta f}{\varepsilon_0 \cdot \rho \cdot f_p^3 \cdot (D + d)^2}}$	2, 4, 5

5.2.5. Пьезомодули d_{31} и d_{33} в динамическом режиме пьезоэлементов (п.п. 1.3.4) определяют по формулам (см. табл. П4.1).

Примечания

1. Формулы для определения скорости звука и пьезомодуля для пьезоэлементов из материалов ТБК-3 справедливы только при следующих соотношениях размеров:

$$\frac{a}{L} \leq 0,3; \quad \frac{b}{L} \leq 0,3; \quad \frac{4 \cdot L}{\pi \cdot D} \leq 0,35.$$

2. Формулы для определения скорости звука и пьезомодуля для пьезоэлементов из материалов ТБК-3 справедливы только, когда:

$$\frac{4 \cdot L}{\pi \cdot (D + d)} \leq 0,35.$$

3. Формулы для определения скорости звука и пьезомодуля для пьезоэлементов из материалов ПТС-19, ПТС-3 справедливы при следующих соотношениях размеров:

$$\frac{a}{L} \leq 0,5; \quad \frac{b}{L} \leq 0,5; \quad \frac{4 \cdot L}{\pi \cdot D} \leq 0,5.$$

4. Формулы для определения скорости звука и пьезомодуля для пьезоэлементов из материалов ПТС-19, ПТБС-3 справедливы при следующих соотношениях размеров:

$$\frac{4 \cdot L}{\pi \cdot (D + d)} \leq 0,5.$$

5. Поправка при расчете скорости звука c_1^E представлена на рис. П.4.2.

6. Поправка при расчете пьезомодуля d_{31} представлена на рис. П.4.3.

5.2.6. Обозначения, принятые в табл. П4.1, единицы измерений:

L – длина пластины, м;

A – ширина пластины, м;

B – высота пластины, м;

D – диаметр наружный кольца (трубки), м;

D – диаметр внутренний кольца (трубки), м;

S – площадь поперечного сечения стержня, м²;

C_0 – емкость статистическая, Ф;

P – плотность, кг/м³;

f_p – частота радиального резонанса, Гц;

f_a – частота антирезонансная, Гц;

$\Delta f = (f_a - f_p)$ – резонансный промежуток, Гц;

$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость;

d_{31}, d_{33} – пьезомодули в динамическом режиме, Кл/Н;

c_1^E, c_3^D – скорость звука радиальных колебаний и толщинных колебаний соответственно, м/с;

t – поправка для скорости звука c_1^E (см. рис. П4.2);

η – поправка для пьезомодуля d_{31} (см. рис. П4.3).

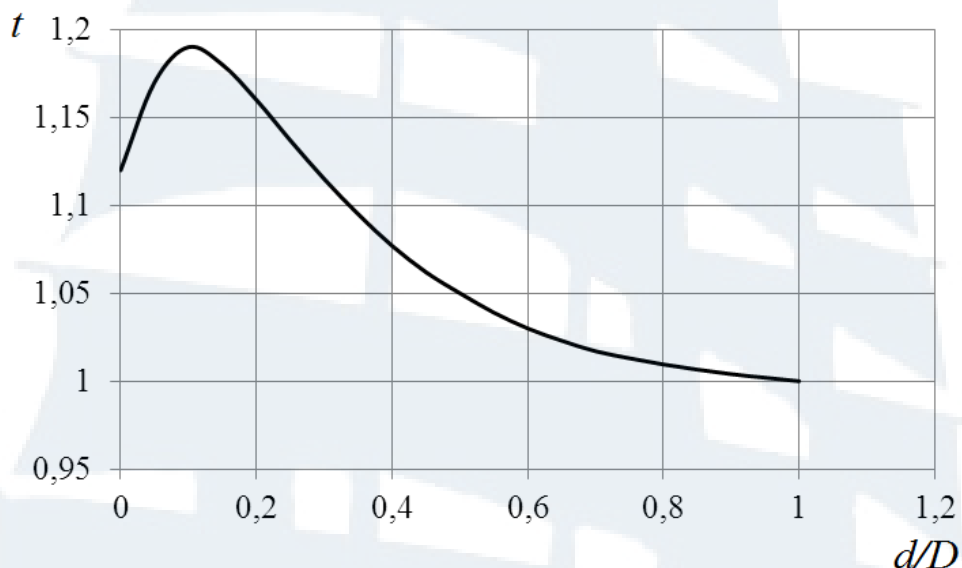


Рис. П4.2. Зависимость поправки t от соотношения диаметров кольца или трубки d/D

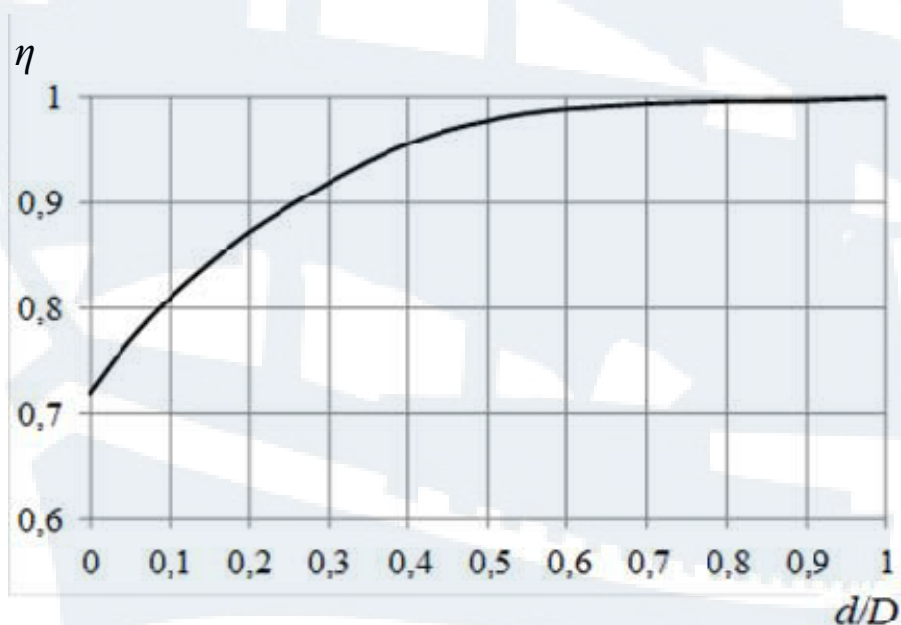


Рис. П4.3. Зависимость поправки η от соотношения диаметров кольца или трубки d/D

5.2.7. Частота f_p для дисков, трубок и шайб соответствует резонансной частоте радиальных колебаний, для стержней – колебаниям по длине.

6. Обработка результатов контроля

6.1. Измеренные и вычисленные значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$, пьезомодулей в динамическом режиме d_{31} , d_{33} , скорости звука c_1^E , c_3^D сравнить с соответствующими значениями параметров, приведенными в таблице справочного Приложения 4.2.

6.2. Если хотя бы одна из характеристик пьезоэлемента не укладывается в интервалы, приведенные в таблице справочного Приложения 4.2, данный пьезоэлемент бракуется, в журнале контроля делается пометка «брак», и с этим пьезоэлементом дальнейшая работа не производится.

6.3. Журнал контроля оформляется согласно рекомендациям Приложения 4.4.

7. Требования безопасности

7.1. В целях обеспечения безопасности труда при проведении контроля и определении характеристик пьезоэлементов для предупреждения поражения электрическим током необходимо предусмотреть:

- защиту изоляции наружной электропроводки оборудования от механических, химических и термических повреждений;
- ограничение доступных для прикосновения незаизолированных элементов оборудования, находящихся под напряжением;
- надежное заземление оборудования;
- выполнение «Правил техники безопасности при эксплуатации установок потребителей», утвержденных Госэнергонадзором.

7.2. Работа может производиться только персоналом, ознакомленным с инструкциями по технике безопасности, действующими на предприятии, с техническими описаниями и инструкциями по эксплуатации используемой аппаратуры.

**Определение поверхностных дефектов
пьезоэлементов**

1. Скол – это повреждение ребра, образованное пересечением плоских или криволинейных поверхностей пьезоэлемента.

2. Вырыв – это местное отклонение поверхности пьезоэлемента от правильной геометрической формы. К вырывам относятся такие повреждения поверхностей пьезоэлемента, выходящие на ребро, если при этом длина поврежденного участка ребра меньше максимального размера повреждения, параллельного ребру. При этом вырыв считается на той поверхности пьезоэлемента, где его площадь максимальна.

3. Пора (открытая) – это внутренняя рана не механического происхождения, выходящая на поверхность пьезоэлемента.

4. Просвет – это участок металлизированной поверхности керамики с полным или частичным отсутствием покрытия.

5. Шелушение – это частичное отслаивание покрытия, не достигающее до появления просветов.

Приложение 4.2
Справочное

Таблица П4.2

Электрофизические характеристики пьезоэлементов

<i>Наименование характеристики, размерность</i>	<i>Материал пьезоэлементов, технические условия на пьезоэлементы</i>		
	<i>ТБК-3 СЭО.712.002ТУ ОДО.712.009ТУ</i>	<i>ЦТС-19 ОДО.339.190 ТУ</i>	<i>ЦТБС-3 СЭО.712.004 ТУ</i>
Относительная диэлектриче- ская проницаемость $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	1 000÷1 360	1 400÷2 050	1 800÷2 800
Скорость звука радиальных колебаний c_1^E , м/с	4 550÷4 850	3 000÷3 600	3 370÷3 610
Скорость звука толщинных колебаний c_3^D , м/с	5 150÷5 450	—	3 820÷4 020
Пьезоэлектрические модули: d_{31} , Кл/Н, не менее d_{33} , Кл/Н, не менее	$43,3 \cdot 10^{-12}$ $83,3 \cdot 10^{-12}$	$100,0 \cdot 10^{-12}$ $200,0 \cdot 10^{-12}$	$125,0 \cdot 10^{-12}$ $320,0 \cdot 10^{-12}$
Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях до увлажнения $\text{tg}\delta$, не более	0,020	0,035	0,012

Приложение 4.3
Рекомендуемое

Таблица П4.3

Перечень рекомендуемых средств измерения

<i>Средство измерения</i>	<i>Тип</i>	
Милливольтметр	В3-39 В3-40	ТУ4.ЯЫ2.710.034 ТУ-77 ТУ4.ЯЫ2.710.035 ТУ-77
Вольтметр универсальный	В7-26	ТУ4.ЯЫ2.728.027 ТУ-78-Е
Генератор сигналов высокочастотный	Г4-102	ТУ4.ЕЭ3.260.068 ТУ-79
Генератор импульсов	Г5-54	ТУ4.ГВ3.264.029 ТУ-78Е
Измеритель индуктивности, емкости и сопротивления универсальный	Е7-11	ТУ4.Е32.724.010. ТУ-78
Частотомер электронно-счетный	Т3-33	ТУ4.И22.721.028 ТУ-80

Приложение 4.4

Таблица П4.4

Форма записи результатов контроля пьезоэлементов

<i>Контролируемый параметр, обозначение, размерность</i>	<i>Порядковый номер пьезоэлемента</i>	
	<i>1</i>	<i>...n</i>
Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях до увлажнения $\operatorname{tg}\delta$		
Статическая емкость C_0 , Ф		
Относительная диэлектрическая проницаемость $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$		
Резонансная частота f_p , Гц		
Напряжение на резонансной частоте U_p , В		
Частота антирезонанса f_a , Гц		
Напряжение на антирезонансной частоте U_a , В		
Резонансный промежуток Δf , Гц		
Скорость звука радиальных колебаний c_1^E , м/с		
Скорость звука толщинных колебаний c_3^D , м/с		
Пьезоэлектрические модули d_{31}, d_{33} , Кл/Н		

СТП 2-XXX-79

**Преобразователи пьезокерамические.
Склеивание деталей клеящими массами
ДМ-5-65, ДС-65, ДГ-65**

1. Технологический процесс склеивания

Таблица П5.1

Подготовка склеиваемых поверхностей. Карта 1

№ операции	№ перехода	Операции и переходы	Оборудование, инструменты	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Температура, °C	Время	
I		Обезжиривание					
	1	Погрузить пьезокерамику в ванну со спирто-бензиновой смесью	Ванна, пинцет	Спирто-бензиновая смесь 1:1	18-20	5 сут.	
	2	Погрузить накладки в ванну с бензином	Ванна, пинцет		18-20	1 сут.	Накладки с впеченными резиновыми мембранами погружать в бензин только оклеиваемой поверхностью, не касаясь резиновой мембраной
	3	Извлечь пьезокерамику из ванны со спирто-бензиновой смесью	Стол, пинцет				
	4	Извлечь накладки из ванны с бензином	Стол, пинцет				

Продолжение табл. П5.1

№ операции	№ перехода	Операции и переходы	Оборудование, инструмент	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Температура, °С	Время	
	5	Протереть склеиваемые поверхности	Стол, ванна	Спирто-бензиновая смесь 1:1, марлевый тампон			Вторично обезжирить марлевым тампоном со свежим раствором спирто-бензиновой смеси 1:1
	6	Сушить	Стол, фен		20-25		
II		Механическая обработка					
	7	Произвести зачистку склеиваемых поверхностей (кроме пьезо-керамических элементов)	Стол	Шкурка шлифовальная			Зачищать поверхность в одном направлении (10-15 ходов)
	8	Промыть проточной питьевой водопроводной водой	Ванна с душевым устройством	Марлевый тампон	20-25		

Окончание табл. П5.1

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудо-вание, инстру-мент	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Темпе-ратура, °С	Вре-мя	
	9	Обезжирить поверх-ности деталей водной кашицей венской из-вести или зубного порошка	Стол	Марлевый тампон, венская из-весть, зуб-ной поро-шок			1. Выдержать на воздухе поверх-ности смазанные водной кашицей венской извести или зубного порошка 10-15 мин. 2. Операцию повторить до полной смачиваемости склеиваемых поверхностей
	10	Промыть проточной водопроводной водой	Ванна с душевым устрой-ством		20-25	2 мин	Поверхность должна равномерно смачиваться водой
	11	Сушить	Фен		20-25	60 мин	

**Контроль качества клеящей массы ДМ-5-65 и клеящих токопроводящих масс
ДС-65 и ДГ-65. Карта 2**

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудо-вание, ин-стру-мент	Мате-риалы	Режимы		Дополнительные указания
					Тем-пе-ра-тура, °С	Вре-мя	
1		Определение прочности клевого-го состава на образцах-грибках					
	1	Обработать склеиваемые поверхности грибков со-гласно операции II карты I настоящего стандарта					Количество испытуемых образцов не менее пяти (по два грибка на образец)
	2	Склеить образцы-грибки согласно операции I-II карты 3 настоящего стан-дарта	Приспо-собление для склеи-вания образцов-грибков	Клеящая масса ДМ-5-65 ДС-65 ДГ-65			
	3	Испытать прочность клее-вого соединения образцов-грибков на разрывной ма-шине	Разрывная машина				1. Испытания на разрывной машине вести при скорости нагружения $1,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (11 мм/мин)

Продолжение табл. П5.2

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудо-вание, инстру-мент	Мате-риалы	Режимы		Дополнительные указания
					Тем-пе-ра-тура, °С	Вре-мя	
							2. Средняя арифметическая прочность колесного соединения образцов-грибков должна быть не менее $260 \cdot 10^5$ Па. При тщательной предварительной подготовке склеиваемых поверхностей разрыв должен быть по клеевому шву
	3	Испытать прочность кле-евого соединения образцов-грибков на разрывной машине	Разрыв-ная ма-шина				1. Испытания на разрывной машине вести при скорости нагружения $1,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (11 мм/мин). 2. Средняя арифметическая прочность колесного соединения образцов-грибков должна быть не менее $260 \cdot 10^5$ Па. При тщательной предварительной подготовке склеиваемых поверхностей разрыв должен быть по клеевому шву
II		Определение омического сопроти-вления токопроводящей массы ДС-65, ДГ-65					

Продолжение табл. П5.2

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудо-вание, ин-стру-мент	Мате-риалы	Режимы		Дополнительные указания
					Тем-пе-ра-тура, °С	Вре-мя	
	4	Поместить в форму свежес-приготовленную тщатель-но перемешанную токо-проводящую массу	Форма для изме-нения омическо-го сопро-тивления токопро-водящей массы ДС-65, ДГ -65	Клеящая масса ДС-65 ДГ -65		15 мин	Образец массы берется в не отвержден-ном состоянии. Заполненную массу при-жать шпателем для полного заполнения формы
	5	Произвести выравнивание массы, одновременно сни-мая избыток массы	Шпатель, нож				
	6	Оставшийся тонкий слой массы на форме удалить сухим марлевым тампоном		Марле-вый там-пон			

Окончание табл. П5.2

№ операции	№ перехода	Операции и переходы	Оборудование, инструмент	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Температура, °С	Время	
		Произвести измерение омического сопротивления с помощью моста постоянного тока	Форма с токопроводящей клеящей массой ДС-65, ДГ-65. Мост Винстона тип ММВ	Клеящая масса ДС-65, ДГ-65			<p>Расчет удельного сопротивления производится по формуле:</p> $\rho_v = \frac{R \cdot b \cdot s}{L},$ <p>ρ_v – удельное сопротивление, Ом/м; R – омическое сопротивление образца, Ом; b – ширина образца, м; s – толщина образца, м; L – длина образца, м.</p> <p>Удельное сопротивление токопроводящей клеящей массы ДС-65 должно составлять $4,2 \cdot 10^{-4}$ Ом</p>
	7						

Склеивание деталей пьезокерамического преобразователя. Карта 3

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудование, инструмент, приспособле-ния	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Темпе-рату-ра, °С	Время	
I		Нанесение клеевой массы					
	1	Нанести две точки токопроводящего клея ДС-65 диаметром 5 мм на обе стороны пьезоке-рамики в диаметральном противоположном направлении, отступая от края 2 мм	Стол, шпатель	Токопрово-дящий клей ДС-65	18-22		Приготовление токопровода-щего клея ДС-65 дано в Приложении 4
	2	Нанести тонким равномерным слоем на оклеиваемые поверхности клеящую массу ДМ-5-65	Стол, шпатель	Клеящая масса ДМ-5-65	18-20		1. Приготовление клеящей массы ДМ-5-65 дано в Приложении 2, 3. 2. Нанести клеящую массу ДМ-5-65 на склеиваемые поверхности, не закрывая токопроводящие точки

Продолжение табл. П5.3

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудование, инструмент, приспособления	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Температура, °С	Время	
	3	Соединить склеиваемые поверхности					
	4	Уложить склеенные преобразователи в специальное ориентирующее приспособление	Цеховые приспособления	Пленка полиэтиленовая			Склеенные преобразователи изолировать от приспособления тонкой полиэтиленовой пленкой во избежание попадания клеящей массы на приспособление
	5	Зажать в приспособление	Цеховое приспособление по СТП 35-ХХ-74				Толщина клеевого слоя должна соответствовать техническим требованиям. Давление зажима 0,25 МПа (2,5 кгс/см ²)
	6	Снять марлевым тампоном, слегка смоченным в ацетоне, избыток клеящей массы	Стол	Ацетон, марлевый тампон			
II		Отверждение клеевых швов					

№ операции	№ пере-хода	Операции и переходы	Оборудование, инструмент, приспособления	Материалы	Режимы		Дополнительные указания
					Температура, °С	Время	
	7	Приспособление поместить в термостат	Термостат собственного изготовления		25-30		Приспособление поместить в термостат при температуре не выше 25-30 °С
	8	Выдержать преобразователи в приспособлении для отверждения клеевого шва	Цеховое приспособление		60-65	48 ч	Температура выше 65 °С не допустима для керамики ТБК
	9	Отключить термостат	Термостат собственного изготовления				Приспособление охладить до температуры 25-30 °С при закрытых дверцах термостата
	10	Извлечь приспособление из термостата					

Примечание. Технические характеристики оборудования, инструментов, приспособлений указаны в Приложении 6. Контроль склеенных преобразователей по СТП-35-XXX-78 «Аппаратура гидроакустическая. Антенны. Методы измерения электроакустических параметров и характеристик» (см. приложение).

2. Техника безопасности

2.1. К работе по приготовлению клеящей массы ДС-65, ДГ-65 и ДМ-5-65 и склеиванию деталей этой клеящей массой допускаются лица, ознакомленные с правилами техники безопасности.

2.2. Технологические операции склеивания необходимо производить, руководствуясь «Правилами и нормами техники безопасности, пожарной безопасности и промышленной санитарии для окрасочных цехов».

2.3. Все операции производить в изолированном помещении, оборудованном приточно-вытяжной вентиляцией.

2.4. При работе с эпоксидной клеящей массой ДС-65, ДГ-65 и ДМ-5-65 пользоваться полиэтиленовыми перчатками на бязевой прокладке.

2.5. В качестве емкостей для переноса небольших количеств компонентов клеящей массы применять бумажные стаканчики, которые по окончании работы сжигать.

2.6. Рабочую поверхность столов покрывать бумагой, которую после окончания работы сжигать.

2.7. В рабочем помещении должна быть установлена раковина с подводом холодной и горячей воды.

2.8. Поверхность стен, потолков, полов, оборудования должна быть гладкой и обмываться горячей мыльной водой или содовым раствором не реже 1 раза в неделю.

2.9. Работающие с эпоксидной клеящей массой ДС-65, ДГ-65 и ДМ-5-65 обязаны в течение рабочего дня периодически мыть лицо и руки горячей водой, вытирать бумажными полотенцами разового пользования.

2.10. Прием пищи на производственном участке запрещен.

2.11. Брызги смолы отвердителя или клеящей массы ДС-65, ДГ-65 и ДМ-5-65, попавшие на кожу, должны быть немедленно смыты марлевым тампоном, смоченным ацетоном, после чего пораженное место тщательно промыть теплой мыльной водой и осушить с помощью бумажных полотенец разового пользования.

Приложение 5.1
Обязательное

Таблица П5.4

Материалы, применяемые для склейки

<i>Наименование</i>	<i>ГОСТ, ТУ</i>
Эпоксидная смола ЭД-20	ГОСТ 10587-76
Порошок серебряный ПС-1	ГОСТ 9724-61
Титанат бария	ГОСТ 13927-74
Окись алюминия	ТУ 609-426-70
Окись цинка	ГОСТ 10262-73
Графит электропроводящий	ГОСТ 8295-73
Триэтаноламин	ТУ 602-916-74
Малеиновый ангидрид	ГОСТ 5854-68
Спирт этиловый	ГОСТ 17299-71
Ацетон технический	ГОСТ 2608-71
Смола ДЭГ-1	МРТУ 6-05-1223-69
Бензин Б-70	ГОСТ 1012-72
Зубной порошок	ГОСТ 5972-77
Марля бытовая	ГОСТ 11109-74
Пленка полиэтиленовая	ГОСТ 10354-79
Шкурка шлифовальная 0-00	ГОСТ 2456-75

1. Технология приготовления клеящей массы ДМ-5-65

1.1. Подготовка наполнителей

1.1.1. Проверить тонину помола наполнителей – титаната бария, окиси алюминия, окиси цинка, как указано в Приложении 5.3. Если тонина помола не соответствует указанным требованиям, произвести помол в шаровой мельнице.

1.1.2. Помол титаната бария произвести в шаровой мельнице ультра фарфоровыми шарами марки МФ-46 диаметром 30-60 мм со скоростью вращения барабана (0,7-0,8 с⁻¹). Загрузку барабана произвести на 2/3 его объема в соотношении: материал, шары, вода 1:1:1. Ориентировочное время помола 30-70 часов. По истечении указанного времени произвести контрольное определение тонины помола в соответствии с Приложением 5.3. При необходимости время помола продлить. По окончании помола титанат бария выгрузить из шаровой мельницы, отстоять, слить воду, высушить в термостате при температуре 105-110 °С до воздушно сухого состояния. Высушенный титанат бария пропустить через сито № 0112 (2 360 отв. в см²), после чего просеять через сито № 0056 (10 085 отв. в см²) или № 006 (10 000 отв. в см²). Титанат бария хранить в сосудах с завинчивающимися крышками или притертыми пробками.

1.1.3. Помол окиси алюминия произвести в той же шаровой мельнице. Загрузить барабан на 2/3 его объема в соотношении: материал, шары, вода 1:1:1. Ориентировочное время помола 24 часа. Тонину помола определить так же, как и для титаната бария. Подготовленную окись алюминия хранить в стеклянных сосудах с завинчивающимися крышками или притертыми пробками.

1.1.4. Помол окиси цинка и ее хранение осуществляется так же, как и для титаната бария (см п. 1.1.2).

1.2. Подготовка отвердителей и эпоксидной смолы

1.2.1. Навеску смолы взять в фарфоровый стакан, установить в термостат и нагреть до температуры 80-90 °С, выдержать в течение 3 часов.

1.2.2. Подготовленные навески наполнителей: окиси алюминия, титаната бария, окиси цинка сушить при температуре 125-130 °С в течение 2-х часов на противнях слоем 5-8 мм.

1.2.3. Налить в стеклянный стакан 50-100 г триэтанолamina, установить в термостат и сушить при температуре 105-110 °С в течение 3-х часов. Охладить термостат с закрытой дверцей до температуры 50-60 °С и перелить в узкогорлую сухую банку с притертой пробкой. Хранить в темном месте.

1.2.4. Вынуть из термостата навески смолы и наполнителя. Ввести наполнители и триэтанолamin калибровочной пипеткой в смолу и тщательно перемешать смесь до однородной массы. Калибровка пипетки производится в химической лаборатории следующим образом: в предварительно взвешенный на аналитических весах, пипеткой отмерить 100 капель триэтанолamina и снова взвесить. По разности весов определяют вес 100 капель. Разделив полученный вес на 100, получают вес 1 капли. Зная, сколько граммов триэтанолamina нужно ввести, разделим этот вес на вес 1 капли и определяем количество капель триэтанолamina, которое необходимо ввести в смолу.

1.2.5. Установить стакан с массой в вакуумный термостат, нагретый до температуры 80-90 °С, и произвести обезвоздушивание массы. Во избежание выброса массы из стакана обезвоздушивание производить ступенчато, поочередно создавая и снимая вакуум. Постепенно довести вакуум до показания на шкале вакуумметра «1» и выдержать массу в течение 25 минут.

1.2.6. Вынуть массу из автоклава и перенести в вытяжной шкаф.

1.2.7. Охладить массу на воздухе до температуры 65 °С.

1.2.8. Подготовленную массу, предназначенную для склеивания, для повышения ее вязкости необходимо выдержать в закрытом сосуде до вязкости 25-50 по воронке ВЗ-7 при температуре 4-8 °С.

Для удлинения срока жизни клеевой массы хранить ее в холодильнике в герметично закрытом объеме при температуре 4-8 °С до 15-20 дней.

Рецептура клеящей массы ДМ-5-65 представлена в табл. 5.5.

Рецептура клеящей массы ДМ-5-65

<i>Компоненты</i>	<i>Количество массовых частей</i>				
Эпоксидная смола ЭД-20	7,00	3,00	100,00	1,00	2,00
Окись алюминия	3,50	1,50	50,00	0,50	1,00
Титанат бария	7,00	3,00	100,00	1,00	2,00
Окись цинка	0,70	0,30	10,00	0,10	0,20
Триэтаноламин	0,74	0,31	10,60	0,11	0,21
	Всего		270,6		

2. Технология приготовления клеящей массы ДС-65 и ДГ-65

2.1. Навеску смолы высушить в термостате при температуре 105-115 °С в течение 3 часов.

2.2. Охладить термостат с закрытой дверцей до температуры 60-50 °С.

2.3. Нужное количество наполнителя (порошка серебряного ПС-1 графита электропроводного) высушить в термостате при температуре 105-115 °С в течение 3 часов.

2.4. Охладить термостат до температуры 60-50 °С.

2.5. Триэтаноламин сушить по технологии (см. Приложение 2 «Технология приготовления клеящей массы ДМ-5-65»).

2.6. Вынуть из термостата навески смолы, наполнителя, триэтанолamina. Ввести наполнитель и триэтаноламин калиброванной пипеткой в смолу и тщательно перемешать смесь до однородной массы.

2.7. Подготовленную таким образом массу для повышения ее вязкости необходимо выдержать в закрытом сосуде до вязкости 35 секунд по воронке № ВЗ-7.

Для удлинения срока жизни клеевая масса ДС-65 и ДГ-65 хранится в холодильнике в герметично закрытой посуде при температуре 4-8 °С.

Рецептуры клеящих масс ДС-65 и ДГ-65 представлены в таблицах П5.6 и П5.7 соответственно.

Примечание. Если вязкость смолы ЭД-20 при температуре 25 °С выше 35 секунд, то она разбавляется смолой ДЭГ-1 или Э-181 до нужной вязкости в соотношении 5-15 % к весу ЭД-20.

Таблица П5.6

Рецептура клеящей массы ДС-65

<i>Компоненты</i>	<i>Количество массовых частей</i>		
Эпоксидная смола ЭД-20	0,5	0,75	100
Молекулярное серебро	1	1,5	200
Триэтаноламин	0,07-0,08	0,105-0,12	14-17

Таблица П5.7

Рецептура клеящей массы ДГ-65

<i>Компоненты</i>	<i>Количество массовых частей</i>			
Эпоксидная смола ЭД-20	1	1,5	3	100
Графит электропроводящий	0,8	1,2	2,4	60
Триэтаноламин	0,14-0,17	0,21-0,255	0,51	14-17

Контроль тонины помола наполнителей

1. Взвесить сито № 006 (10 000 отв/см²) или № 0056 (10 085 отв/см²)
2. Взвесить 20 г наполнителя.
3. Поместить навеску наполнителя на предварительно взвешенное сито и промыть слабой струей воды до прекращения прохождения наполнителя через сито. При промывке разрешается проводить по сити мягкой кистью.
4. Остаток на сите смочить ацетоном.
5. Высушить остаток на воздухе в течение 30 мин, а затем в термостате при температуре плюс 105-110 °С до постоянного веса.
6. Охладить остаток вместе с ситом и взвесить на весах с точностью 0,01 г.
7. Вычислить остаток в процентах по формуле:

$$x = \frac{b}{a} \cdot 100\% ,$$

где a – масса навески наполнителя, г;

b – масса остатка на сите, г.

Для наполнителей, входящих в состав массы ДМ-5-65, остаток на сите не должен превышать 1 %. В противном случае наполнитель подвергнуть дополнительному помолу (см. Приложение 2).

СТП 3-XXX-78

**Аппаратура гидроакустическая.
Антенны. Методы измерений
электроакустических параметров
и характеристик**

ВВЕДЕНИЕ

Стандарт распространяется на гидроакустические антенны, элементы антенн, работающие в режиме излучения и приёма (в дальнейшем акустические приборы) и устанавливает методы, условия, средства измерений электроакустических параметров и характеристик на заводе-изготовителе.

Стандарт устанавливает методы измерения следующих параметров и характеристик акустических приборов:

- чувствительности по напряжению (или току) в режиме излучения и её частотной характеристики;
- чувствительности в режиме приёма и её частотной характеристики;
- резонансной частоты в режиме излучения и приёма;
- ширины частотной характеристики чувствительности на уровне 0,7 от максимального значения;
- характеристики направленности в режиме приема и излучения;
- ширины характеристики направленности на уровне 0,7 от значения основного максимума;
- модуля полного электрического сопротивления и его частотной характеристики;
- активной составляющей полного электрического сопротивления;
- электрической ёмкости;
- индуктивности;
- добротности.

Стандарт не распространяется на образцовые измерительные акустические приборы.

Выполнение требований стандарта является обязательным при измерении электроакустических характеристик и параметров в процессе разработки и изготовления акустических приборов.

Обозначения и терминология, примененные в стандарте, приведены в Приложении 6.1 и рекомендуемом Приложении 6.2, соответственно.

Термины, условные обозначения и сокращения, регламентируемые стандартом, должны применяться в протоколах и других документах по испытаниям акустических приборов.

1. Измерительные средства

1.1. Измерительные бассейны

1.1.1. Типоразмеры измерительных бассейнов представлены в табл. Пб.1.

Таблица Пб.1

Типоразмеры измерительных бассейнов

№ бассейна	Размеры бассейна, м		
	L_x	L_y	L_z
1	4	2	2
2	8	4	4

Допускается использование бассейнов других размеров, удовлетворяющих требованиям разделов 1, 2, 3.

1.1.2. Бассейн заполняется водопроводной водой. После заполнения бассейна вода отстаивается не менее 20 суток. Периодичность полного слива воды – 1 год.

1.1.3. Внутренние поверхности стен и дна корпуса бассейна облицовываются звукопоглощающим покрытием с коэффициентом поглощения не менее 0,94 в рабочем диапазоне частот.

1.2. Мостовые координатные устройства

Мостовые координатные устройства предназначены для перемещения акустических приборов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, поворота акустических приборов вокруг вертикальной оси.

1.3. Измерительные акустические приборы

1.3.1. Измерительные акустические приборы подразделяются на приемники и излучатели, и предназначены для создания акустического поля в бассейне или измерения величины звукового давления в заданной точке акустического поля.

1.3.2. В режиме излучения и приема должны использоваться измерительные акустические приборы, параметры которых соответствуют пп. 1.3, 2.2 и 2.3.

1.3.3. Измерительные акустические приборы (приемники) должны быть калиброваны по чувствительности с относительной суммар-

ной погрешностью не более $\pm 12\%$. Данные калибровки должны быть отнесены к выходу разъема экранированного кабеля.

1.3.4. Направление калибровки должно быть отмечено меткой на поверхности измерительного акустического прибора.

1.3.5. Сопротивление изоляции измерительных акустических приборов должно быть не менее 10 МОм.

1.3.6. Измерительные акустические приборы должны быть снабжены паспортом и должны проходить государственную поверку в соответствии с графиком поверки не реже одного раза в год. Используемые измерительные акустические приборы указаны в Приложении 3 настоящего стандарта.

1.4. Измерительные электрические приборы

1.4.1. Состав измерительных электрических приборов должен обеспечить комплектацию измерительных схем, предусмотренных методами измерений раздела 3.

1.4.2. Стандартные измерительные электрические приборы должны проходить государственную поверку в соответствии с графиком поверки. Нестандартные измерительные электрические приборы должны быть подвергнуты метрологической аттестации.

1.4.3. Рекомендуется использование измерительных электрических приборов, указанных в справочном Приложении 4 настоящего стандарта, или других приборов, технические характеристики и показатели точности которых не хуже рекомендуемых в Приложении 5.

2. Условия измерений

2.1. Параметры среды

2.1.1. Температура воды в бассейне должна соответствовать значению $+20 \pm 10$ °С.

2.2. Выбор измерительных акустических приборов и расстояния между ними

2.2.1. Рабочий диапазон частот измерительных акустических приборов должен перекрывать рабочий диапазон частот испытуемого акустического прибора. При использовании нескольких измерительных приборов перекрытие рабочих диапазонов по частоте должно

быть не менее 15 %. Рекомендуется использовать измерительные акустические приборы на частотах ниже $0,7 f_0$.

2.2.2. Расстояние между акустическими приборами определяется соотношением:

$$r \geq \frac{2 \cdot D_M^2}{\lambda_B}, \quad (\text{П6.1})$$

где r – расстояние между акустическими приборами, м;

D_M – наибольший из линейных размеров акустических приборов, м;

λ_B – длина волны в воде на верхней частоте рабочего диапазона, м.

2.3. Вид и величина измерительного сигнала

2.3.1. Вид измерительного сигнала.

2.3.1.1. При измерении параметров и характеристик акустических приборов используется тонально-импульсный сигнал.

2.3.1.2. Длительность импульса должна выбираться из условия:

$$\tau_1 < \tau < \tau_2, \quad (\text{П6.2})$$

где τ_1 – минимальная длительность импульсов, с, определяемая характеристиками акустических и электроизмерительных приборов (формула 3);

τ_2 – максимальная длительность импульса, с, определяемая размерами бассейна и расстояниями между акустическими приборами (формула 4).

Перечисленные значения длительностей определяются формулами:

$$\tau_1 > \frac{N}{f}, \quad (\text{П6.3})$$

$$\tau_2 \leq \frac{\Delta r}{c}, \quad (\text{П6.4})$$

где N – число периодов в импульсе, выбирается из условия $N \geq 10$;

f – рабочая или нижняя частота диапазона измерения, кГц;

c – скорость звука в воде, м/с;

Δr – разность хода прямой и отраженной волны, м, определяется по расстоянию, выбранному в соответствии с п. 2.2.2 и размерами бассейна из соотношений:

$$\Delta r = l_X - r, \quad \text{при} \quad r = \sqrt{l_X^2 - l_{Y,Z}^2}, \quad (\text{П6.5})$$

$$\Delta r = \sqrt{l_{Y,Z}^2 - r^2} - r, \quad \text{при} \quad r < \sqrt{l_X^2 - l_{Y,Z}^2}, \quad (\text{П6.6})$$

$$\Delta r = 2r, \quad \text{при} \quad r < \frac{l_Z}{2\sqrt{2}}, \quad (\text{П6.7})$$

где l_X – длина бассейна, м;

$l_{Y,Z}$ – минимальный размер бассейна, м.

2.3.1.3. Частота следования радиоимпульсов должна удовлетворять условию $f_{\text{и}} \leq 50$ Гц.

2.3.1.4. Форма огибающей радиоимпульса должна непрерывно контролироваться.

Асимметрия радиоимпульса относительно оси X не должна превышать 5 %.

2.3.2. Величина измерительного сигнала.

Величина измерительного сигнала должна быть выбрана с учетом следующих факторов:

– работы излучателя на линейном участке амплитудной характеристики;

– работы приемника на линейном участке амплитудной характеристики;

– работы измерительных электрических приборов на линейном участке амплитудной характеристики;

– отсутствие кавитации на поверхности измерительного акустического прибора;

– превышение полезного сигнала над уровнем помех в точке приема не менее чем в 4 раза.

2.4. Подготовка приборов и оборудования для проведения измерений.

2.4.1. Перед началом измерений необходимо убедиться в отсутствии механических повреждений кабеля, разъемов, элементов конструкции акустического прибора.

2.4.2. Активная поверхность акустического прибора должна быть протерта последовательно бензином «Галоша» по ГОСТ 443-76 и спиртом по ГОСТ 115 47-76.

2.4.3. Испытуемые и измерительные акустические приборы должны находиться в воде до начала измерений не менее трех часов или в течение оговоренного технической документацией времени. Перед началом каждого измерения с рабочей излучающей поверхности акустического прибора должны быть механически удалены пузырьки воздуха.

2.4.4. Должно быть измерено сопротивление изоляции акустического прибора с помощью мегомметра, рассчитанного на оговоренное технической документацией напряжение.

2.5. Размещение и ориентация в бассейне акустических приборов

2.5.1. При размещении акустических приборов в бассейне линейные координаты отсчитываются относительно их геометрических центров. Погрешность отсчета не более ± 1 % от заданных величин. Размещение акустических приборов должно обеспечить совпадение направления калибровки измерительного акустического прибора и максимума характеристики направленности испытуемого акустического прибора или оговоренного технической документацией направления.

2.5.2. Окончательное размещение направленных акустических приборов (юстировка акустических осей) производится надстройкой линейных и угловых координат по максимальному значению напряжения на выходе приемного тракта. Юстировка акустических приборов должна производиться перед каждым измерением.

Рекомендуется производить юстировку на резонансной частоте испытуемого акустического прибора.

3. Проведение измерений электроакустических параметров

3.1. Общие положения

3.1.1. Условия измерений должны соответствовать требованиям раздела 2.

3.1.2. Измерительные средства должны соответствовать требованиям раздела 1.

3.2. Измерение чувствительности и ее частотной характеристики в режиме излучения

3.2.1. Чувствительность акустического прибора в режиме излучения определяется по величине развиваемого давления с помощью измерительного приемника при использовании общей схемы, приведенной на рис. Пб.1.

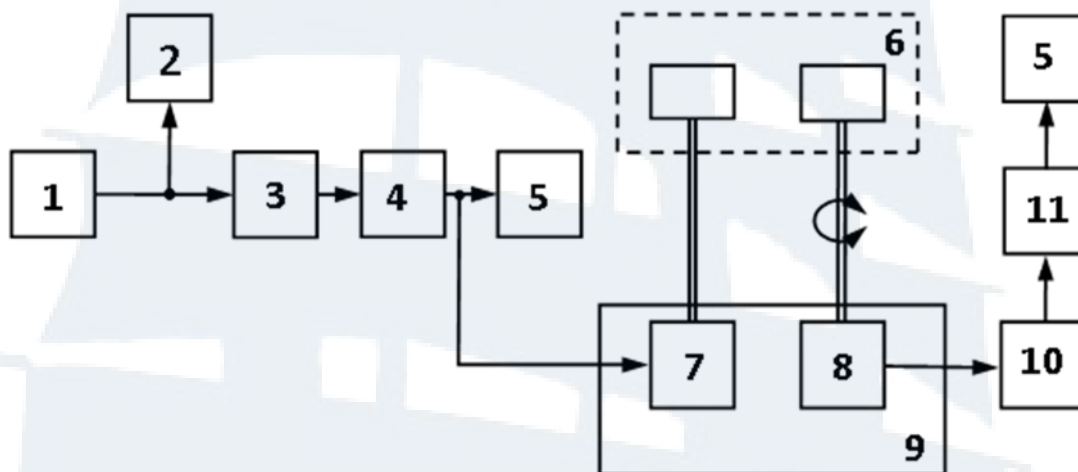


Рис. Пб.1. Схема измерений чувствительности и направленности антенны в режиме излучения:

1 – задающий генератор; 2 – частотомер; 3 – хронизатор-модулятор; 4 – усилитель мощности; 5 – осциллограф; 6 – поворотно-координатное устройство; 7 – испытываемая антенна; 8 – измерительный приемник; 9 – бассейн; 10 – измерительный усилитель; 11 – фильтры

3.2.2. В соответствии с требованиями технических условий на акустический прибор или условиями его использования измеряется чувствительность по току или напряжению.

$$\beta_U = \frac{U_0 \cdot r}{\gamma_0 \cdot U_X}, \quad (\text{Пб.8})$$

$$\beta_I = \frac{U_0 \cdot r}{\gamma_0 \cdot I_X}, \quad (\text{Пб.9})$$

где β_U – чувствительность акустического прибора по напряжению в режиме излучения, а м/В;

β_I – чувствительность акустического прибора по току в режиме излучения, Па м/А;

r – расстояние между акустическими приборами, м;

U_0 – напряжение на выходе измерительного приемника, мкВ;

γ_0 – чувствительность измерительного приемника, мкВ/Па;

U_X – напряжение на испытуемом акустическом приборе, В;

I_X – ток через испытуемый акустический прибор, А.

3.2.3. Шаг дискретизации частоты h_f в долях от значения резонансной частоты в зависимости от добротности акустического прибора для значений частотной характеристики выше уровня 0,7 рекомендуется определять по рис. Пб.2.

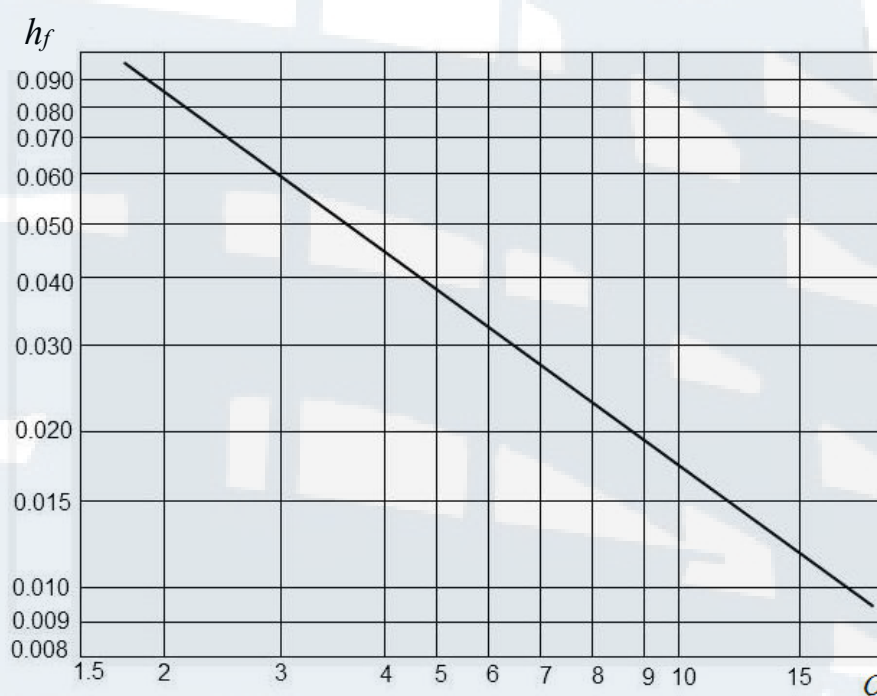


Рис. Пб.2. Шаг по частоте в долях резонансной частоты в зависимости от добротности антенны

3.2.4. При определении максимального значения чувствительности в области резонанса рекомендуется выбирать шаг изменения частоты в два раза меньше шага, указанного на рис. Пб.2. Для значений частотной характеристики ниже уровня 0,7 допускается увеличение шага дискретизации в три раза.

3.2.5. Уровень 0,7 на частотной характеристике чувствительности может быть определен ориентировочно по данным предварительных наблюдений.

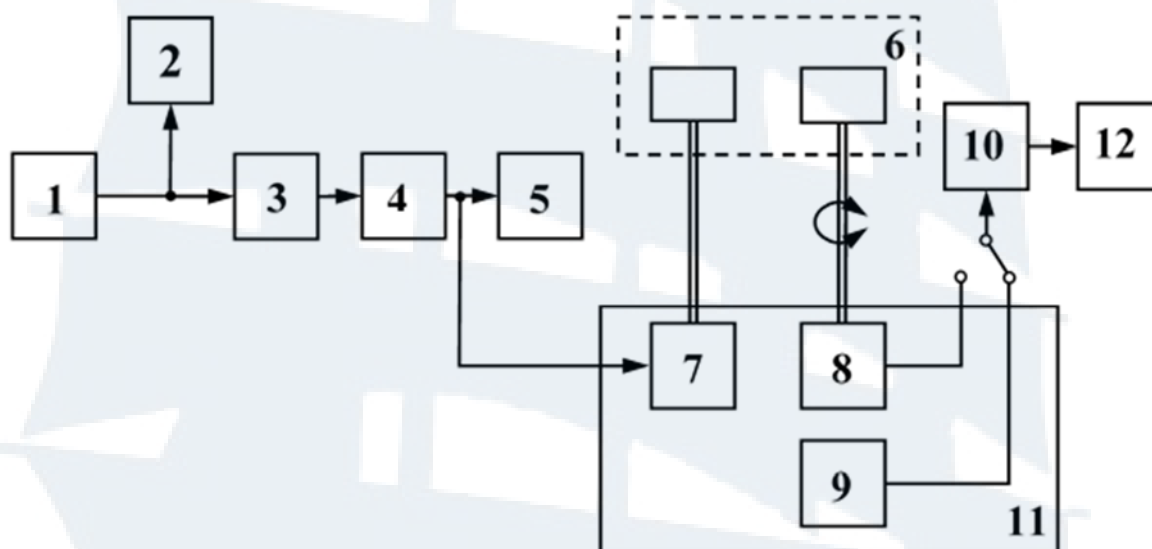
3.2.6. Значение добротности и резонансной частоты должно быть измерено согласно пп. 3.2. и 3.4 соответственно.

3.2.7. По полученным данным чувствительности строятся графики частотных характеристик $\beta_U = U(f)$ или $\beta_I = I(f)$.

3.2.8. Данный метод обеспечивает относительную суммарную погрешность измерений чувствительности в режиме излучения не более $\pm 17\%$.

3.3. Измерение чувствительности и ее частотной характеристики в режиме приема (метод замещения)

3.3.1. Схема измерений чувствительности в режиме приема представлена на рис. Пб.3.



*Рис. Пб.3. Схема измерений чувствительности в режиме приема:
1 – задающий генератор; 2 – частотомер; 3 – хронизатор-модулятор;
4 – усилитель мощности; 5 – осциллограф; 6 – поворотное-координатное
устройство; 7 – измерительный излучатель; 8 – испытуемая антенна;
9 – измерительный приемник; 10 – измерительный усилитель;
11 – бассейн; 12 – фильтры*

3.3.2. При измерении чувствительности методом замещения измерительный и испытуемый акустические приборы устанавливаются последовательно в одну и ту же точку звукового поля. На фиксированных частотах в точке приема производится измерение отношения напряжений, развиваемых испытуемым и измерительным акустическим прибором. При наличии одноканального тракта производится последовательное измерение указанных напряжений при поддержании постоянного напряжения на излучателе.

Значение чувствительности на каждой фиксированной частоте определяется по формуле:

$$\gamma = \gamma_0 \frac{U_X}{U_0}, \quad (\text{П6.10})$$

где γ , γ_0 – чувствительности по полю испытуемого и измерительного акустических приборов, соответственно, мкВ/Па;

U_X , U_0 – напряжения, развиваемые испытуемым и измерительным приборами, соответственно, В.

Примечание. Если чувствительность в режиме приема измеряется с дополнительным кабелем, то значение чувствительности для заданной частоты определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{с(доп.каб.)}} \cdot (C_{\text{н}} + C_{\text{с}} + C_{\text{I}})}{C_{\text{н}}}, \quad (\text{П6.11})$$

где γ , $\gamma_{\text{с(доп. каб.)}}$ – чувствительности по полю испытуемого акустического прибора со стандартным кабелем и дополнительным кабелем, соответственно, мкВ/Па;

$C_{\text{н}}$ – суммарная емкость гидрофона с кабелем, пФ;

$C_{\text{с}}$ – емкость дополнительного кабеля, пФ;

C_{I} – входная емкость измерительного усилителя, пФ.

3.3.3. По полученным данным строится график частотной характеристики чувствительности в режиме приема $\gamma = U(f)$ или $\gamma = I(f)$.

3.3.4. Данный метод обеспечивает относительную суммарную погрешность измерения чувствительности в режиме приема не более $\pm 17\%$.

3.4. Измерение резонансной частоты

3.4.1. Резонансная частота определяется по частотным характеристикам чувствительности, полученным в соответствии с пп. 3.2. или 3.3, как полусумма частот, ограничивающих ширину полосы на уровне 0,9 (или 1 дБ) от максимального значения чувствительности.

3.4.2. Относительная суммарная погрешность измерения резонансной частоты ε_f , в зависимости от добротности антенны Q , находится из графика рис. П6.4.

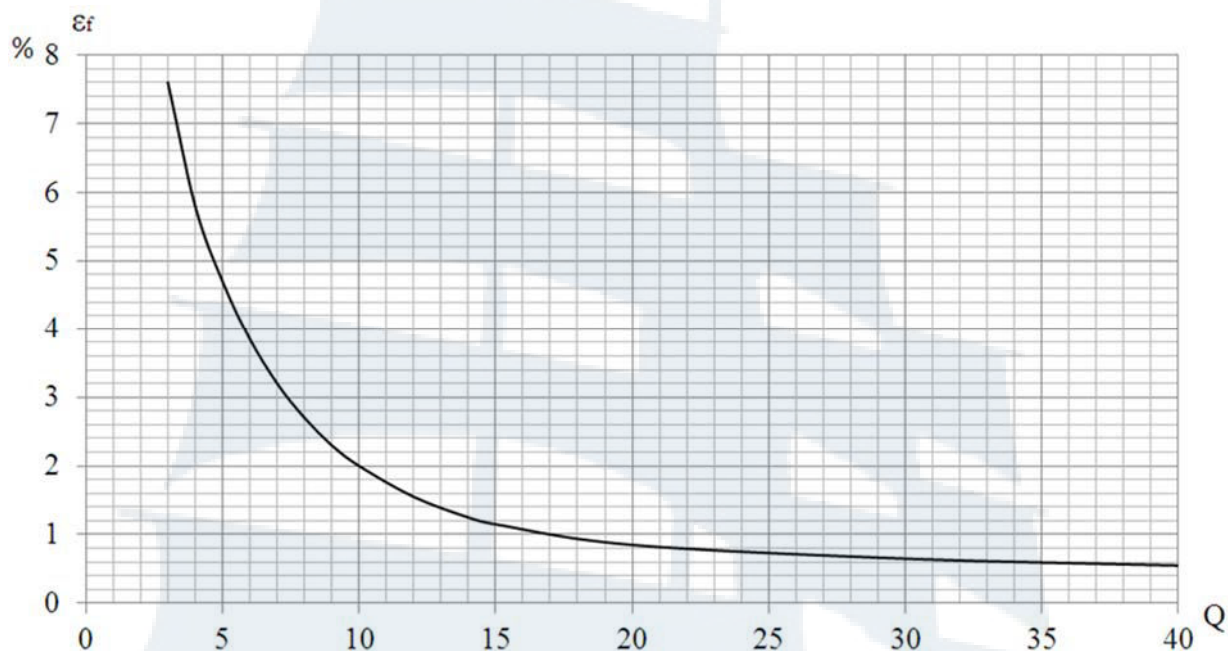


Рис. Пб.4. Основная суммарная погрешность измерений резонансной частоты

3.5. Измерение ширины частотной характеристики чувствительности на уровне 0,7 от максимального значения

3.5.1. Ширина частотной характеристики чувствительности на уровне 0,7 ($\Delta f_{0,7}$) определяется по частотной характеристике чувствительности, полученной по методике пп. 3.2 или 3.3.

На графике частотной характеристики проводится прямая, параллельная оси частот, на уровне 0,7 от максимального значения чувствительности. Разность абсцисс точек пересечения этой прямой с частотной характеристикой равна ширине частотной характеристики чувствительности.

3.5.2. Данный метод обеспечивает относительную суммарную погрешность измерения ширины частотной характеристики чувствительности не более $\pm 13\%$.

3.6. Измерение характеристики направленности

3.6.1. Измерение характеристики направленности должно производиться согласно схеме рис. Пб.1 в режиме излучения и согласно схеме рис. Пб.3 в режиме приема.

3.6.2. При непрерывной записи угловые метки должны подаваться на маркерное перо самописца вручную с датчика меток, либо другого дополнительного устройства. В этом случае определение масштаба записи производится по заданному угловому сектору и соответствующей длине записи. Угловой шаг меток h_m выбирается в зависимости от волнового размера акустического прибора D/λ в соответствии с табл. Пб.2

Таблица Пб.2

Выбор углового шага меток в зависимости от волнового размера антенны

D/λ	1 – 5	5 – 10	более 10
h_m , градус	5	1	0,5

При записи на самописец скорость перемещения ленты и пера самописца определяется из инструкции по применению самописца.

3.6.3. При дискретных измерениях шаг дискретизации по углу должен соответствовать техническим условиям или не должен превышать $0,1 \cdot 2\theta_{0,7}$, где $2\theta_{0,7}$ – ширина характеристики направленности по уровню 0,7 от основного максимума, определяемая по п. 3.7, или оговоренная в технической документации.

Измерение характеристики направленности должно производиться в секторе углов, оговоренном требованиями технической документации.

3.7. Измерение ширины характеристики направленности на уровне 0,7 от основного максимума

3.7.1. Для измерения ширины характеристики направленности на уровне 0,7 от основного максимума по графику характеристики направленности рассчитывается разность угловых координат точек пересечения характеристики направленности с линией, соответствующей уровню 0,7 от максимума.

3.7.2. Для измерения ширины характеристики направленности на уровне 0,7 от основного максимума на экране осциллографа, находится уровень 0,7 от максимального значения при повороте акустического прибора вокруг вертикальной оси относительно основного максимума характеристики направленности сначала в одну, затем в другую сторону.

3.7.3. Ширина основного максимума характеристики направленности определяется величиной полного центрального угла между двумя отмеченными значениями углов, в градусах.

3.7.4. Относительная суммарная погрешность измерения ширины характеристики направленности ε_θ определяется по рис. Пб.5.

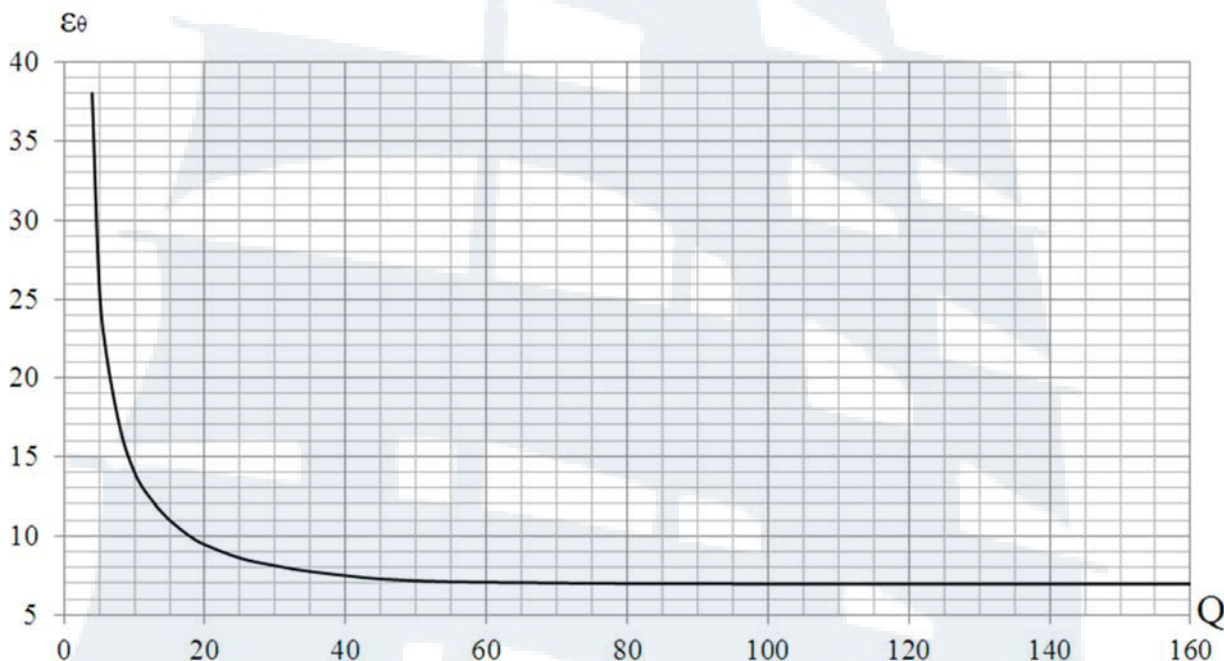


Рис. Пб.5. Основная суммарная погрешность измерений характеристики направленности

3.8. Измерение неравномерности характеристики направленности

3.8.1. Неравномерность характеристики направленности акустических приборов определяется как разность наибольшего и наименьшего уровней характеристики в рабочем диапазоне углов по формуле:

$$\zeta(\theta) = 20 \cdot \lg \frac{U_{\max}(\theta)}{U_{\min}(\theta)}, \quad (\text{Пб.12})$$

где $\zeta(\theta)$ – неравномерность характеристики направленности акустического прибора;

$U_{\max}(\theta)$ и $U_{\min}(\theta)$ – наибольшее и наименьшее значения напряжений на выходе приемного тракта, В.

3.9. Измерение модуля полного электрического сопротивления и его частотной характеристики

3.9.1. Измерение частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления производится по схеме рис. Пб.6. При этом используется тонально-импульсный сигнал и выполняется требование постоянства величины протекающей через антенну тока.

Примечание. При использовании усилителя мощности с несимметричным выходом добавочное сопротивление включается в схему через токовый трансформатор, которому предъявляются следующие требования:

- а) частотная характеристика должна быть линейна в рабочем диапазоне частот, отклонения не должны превышать 0,5 дБ;
- б) фазовые искажения не должны превышать $\pm 2^\circ$;
- в) емкость между обмотками не должна превышать 50 пФ.

3.9.2. Величина добавочного сопротивления R_d должна быть не менее чем в 20 раз больше ориентировочной наименьшей величины модуля полного электрического сопротивления антенны.

Методика измерения частотной характеристики соответствует п. 3.2.

3.9.3. Значение модуля полного сопротивления для каждой фиксированной частоты определяется по формуле:

$$|Z| = R_d \cdot \frac{U_X}{U_{R_d}}, \quad (\text{Пб.13})$$

где $|Z|$ – модуль полного электрического сопротивления акустического прибора, Ом;

U_X – напряжение на выходе акустического прибора, В;

U_{R_d} – напряжение на добавочном сопротивлении, В;

R_d – добавочное сопротивление, Ом.

3.9.4. По полученным данным строится график частотной характеристики модуля полного электрического сопротивления $|Z| = Z(f)$.

3.9.5. Данный метод обеспечивает относительную суммарную погрешность измерения модуля полного электрического сопротивления не более $\pm 12\%$.

3.10. Измерение активной составляющей полного сопротивления, электрической емкости и индуктивности

3.10.1. Измерение активной составляющей полного сопротивления и электрической емкости производится по схеме рис. Пб.7.

Измерения производятся методом электрического баланса моста на резонансной частоте. Эквивалентная электрическая схема пьезокерамической антенны представлена в виде параллельной схемы замещения.

Эквивалентная электрическая схема магнитострикционной антенны представлена в виде последовательной схемы замещения.

Отсчёт активного сопротивления и электрической емкости производится по шкалам магазинов емкости, сопротивления.

3.10.2. Индуктивность магнитострикционного акустического прибора рассчитывается по следующей формуле:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C}, \quad (\text{Пб.14})$$

где L – индуктивность испытуемой антенны, Г;

f_0 – резонансная частота испытуемой антенны, Гц;

C – компенсирующая емкость, измеренная согласно п. 3.10.1, Ф.

Примечание. Допускается измерение индуктивности акустических приборов с помощью измерителей R , L , C (измерительных мостов).

3.10.3. Данный метод обеспечивает относительные суммарные погрешности измерения активной составляющей полного сопротивления и электрической емкости не более $\pm 7 \%$, индуктивности – не более $\pm 8 \%$.

3.11. Измерение добротности

3.11.1. Измерение добротности производится по частотным характеристикам чувствительности.

Добротность акустического прибора определяется по формуле:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (\text{Пб.15})$$

где Q – добротность акустического прибора;

f_0 – резонансная частота, кГц, измеренная по методике п. 3.4;

Δf – ширина частотной характеристики, кГц, измеренная по методике п. 3.5.

3.11.2. Данный метод обеспечивает относительную суммарную погрешность измерения добротности не более $\pm 14\%$.

4. Техника безопасности

4.1. Основные источники опасности при проведении измерений электрических параметров:

– применение горючих материалов при подготовке акустических приборов к испытаниям;

– доставка акустических приборов к месту испытаний с помощью грузоподъемных механизмов;

– подвеска акустических приборов на координатные устройства, находящиеся вблизи открытой поверхности воды;

– подключение выводов акустических приборов к измерительным электроустановкам;

– непосредственная работа на электроустановках в процессе измерений.

4.2. При проведении измерений электроакустических параметров должны соблюдаться правила техники безопасности и требование к квалификации операторов:

– в части электробезопасности в соответствии с действующими «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей»;

– в части перемещения грузов, превосходящих действующие нормы, на переноску вручную, в соответствии с действующими «Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов»;

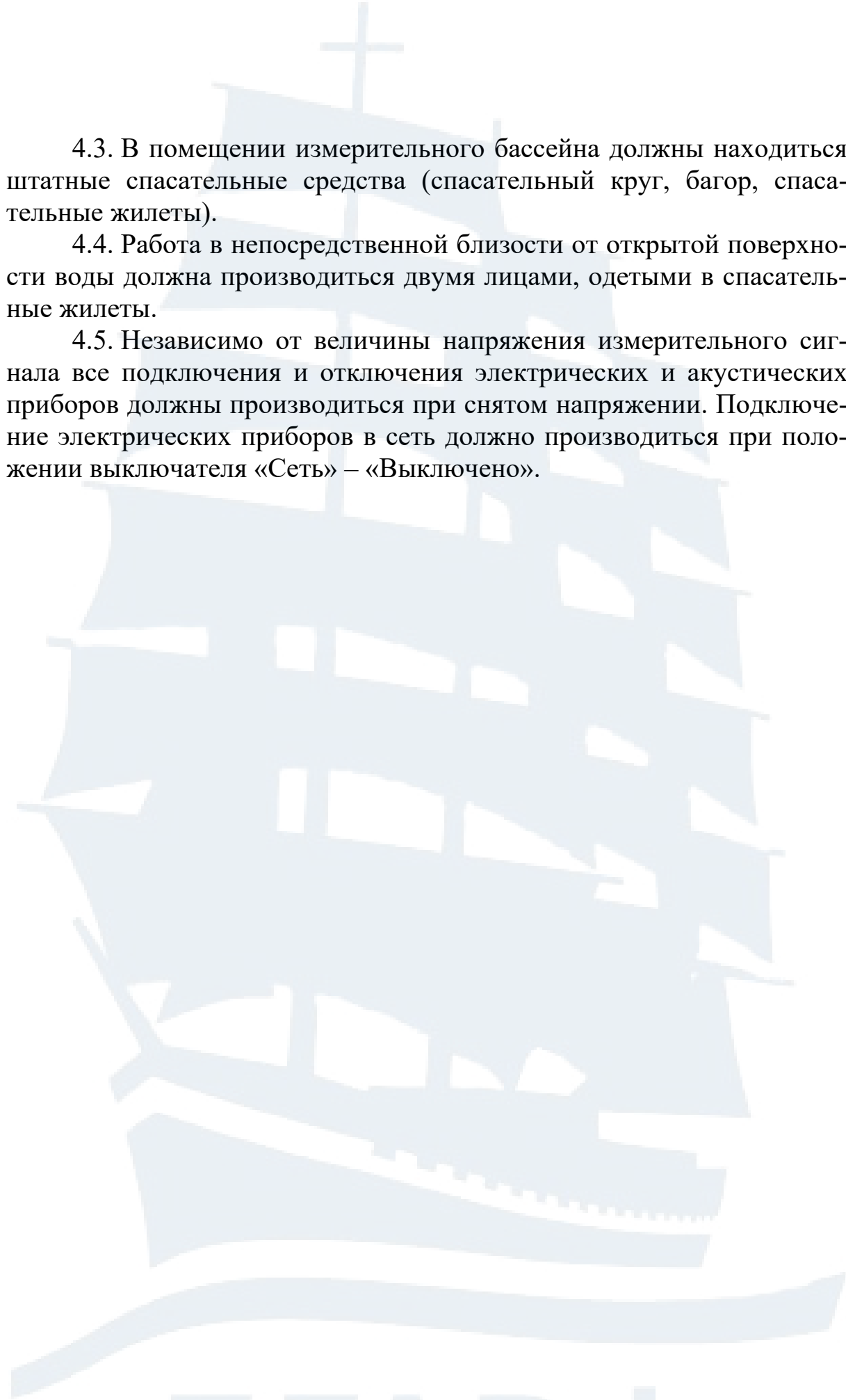
– в части применения горючих материалов в соответствии с основными «Правилами безопасной работы в химической лаборатории»;

– в части пожарной безопасности в соответствии с типовыми «Правилами пожарной безопасности для промышленных предприятий».

4.3. В помещении измерительного бассейна должны находиться штатные спасательные средства (спасательный круг, багор, спасательные жилеты).

4.4. Работа в непосредственной близости от открытой поверхности воды должна производиться двумя лицами, одетыми в спасательные жилеты.

4.5. Независимо от величины напряжения измерительного сигнала все подключения и отключения электрических и акустических приборов должны производиться при снятом напряжении. Подключение электрических приборов в сеть должно производиться при положении выключателя «Сеть» – «Выключено».



Условные обозначения параметров

<i>Условное обозначение</i>	<i>Наименование параметра</i>
U	Электрическое напряжение
I	Электрический ток
W_a	Акустическая мощность
$ Z $	Модуль полного электрического сопротивления
R_w	Активная составляющая полного электрического сопротивления
R	Электрическое сопротивление цепи
C	Электрическая емкость
L	Индуктивность
γ	Чувствительность в режиме приема
β_U	Чувствительность по напряжению в режиме излучения
β_I	Чувствительность по току в режиме излучения
f	Частота
f_0	Резонансная частота
f_p	Рабочая частота
Δf	Ширина частотной характеристики на уровне 0,7
Q	Добротность
$A(f)$	Частотная характеристика измеряемого параметра A
$R(\theta)$	Характеристика направленности
$\zeta(\theta)$	Неравномерность характеристики направленности
h_a	Шаг дискретизации параметра
τ	Длительность радиоимпульса
T	Период следования
λ	Длина волны
c	Скорость звука

<i>Условное обозначение</i>	<i>Наименование параметра</i>
D	Максимальный линейный размер акустического прибора
d	Минимальный линейный размер измерительного акустического прибора
r	Расстояние между геометрическими центрами акустических приборов
l	Длина бассейна
l_x	Ширина бассейна
l_z	Глубина бассейна
N	Число наблюдений
ε	Относительная суммарная погрешность

Таблица П6.4

Термины и определения

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Акустический прибор	Антенна, элемент антенны, работающие в режиме приема или излучения звука
Измерительный акустический прибор	Излучатель или приемник, используемый при проведении измерений параметров испытуемых акустических приборов и имеющий нормированные метрологические характеристики
Рабочая точка поля	Точка звукового поля, в которой определяются параметры поля
Акустическая ось	Направление, оговоренное технической документацией и определяющее пространственную характеристику направленности
Рабочий диапазон	Диапазон значений переменной испытуемого акустического прибора, заданный технической документацией
Измерительный диапазон	Диапазон значений переменной в пределах которого производится измерение параметра и характеристики испытуемого акустического прибора

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Рабочая частота	Регламентированная технической документацией частота, на которой работает испытуемый акустический прибор
Рабочий сигнал	Сигнал с заданными спектральными характеристиками, на прием и излучение которого рассчитывается испытуемый акустический прибор
Измерительный сигнал	Сигнал с заданными спектральными характеристиками, применение которого обеспечивает измерения с регламентированной величиной погрешности
Пороговый акустический сигнал	Сигнал с минимальным уровнем звукового давления, обеспечивающим проведение измерений с погрешностью не выше регламентированной
Чувствительность по напряжению (току) в режиме излучения	Отношение звукового давления, создаваемого акустическим прибором на оси характеристики направленности на расстоянии r , проведенного к 1 м и напряжению (току) на его входе
Чувствительность в режиме приема	Отношение напряжения на выходе акустического прибора, при воздействии на него звукового давления, равного единице
Характеристика направленности	Зависимость чувствительности акустического прибора от угловых координат, отнесенной к ее максимальному значению
Основной максимум характеристики направленности	Участок характеристики направленности между соседними минимумами, включающий ее максимальное значение
Полное электрическое сопротивление	Отношение напряжения на входе акустического прибора к протекающему через него току
Частотная характеристика	Зависимость определяемого параметра акустического прибора от частоты
Неравномерность характеристики	Отношение максимального значения измеряемого параметра к минимальному в рабочем диапазоне величин
Суммарная погрешность	Погрешность, определяемая случайной и систематическими составляющими; выражается интервалом, в котором с вероятностью 0,95 находится измеряемая величина

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Относительная суммарная погрешность	Отношение суммарной погрешности к среднему значению измеряемой величины
Шаг дискретизации	Интервал между двумя последовательными значениями независимой переменной, при которых определяются значения измеряемой величины

Таблица П6.5

Измерительные электрические приборы

<i>Наименование приборов</i>	<i>Тип, модель прибора</i>
Генераторы синусоидальных сигналов	Г4-117; Г3-56
Частотомеры электронно-печатные	ЧЗ-24; ЧЗ-28; ЧЗ-36
Осциллографы	С1-67; С1-68; С1-69
Усилитель мощности	У4-27
Усилители измерительные	У4-28; 2607 («Брюль и Кьер»)
Самописцы уровня	2305 («Брюль и Кьер»), Н-110
Фильтры	1614 («Брюль и Кьер»), RFTST-702 и RFTST-701 (ГДР)
Измерители изоляции	Е6-16; Е6-13
Измерители R, L, C (измерительные мосты)	Е7-4
Хронизатор-модулятор	Нестандартное оборудование
Мосты: а) дифференциальные б) резонансные	
Магазины сопротивлений	Р33
Магазины емкости	Р544

**Требования
к электрическим приборам, используемым
при измерениях электроакустических параметров**

**1. Электрические измерительные приборы излучающего
тракта**

1.1. Генератор синусоидальных сигналов

К техническим характеристикам генератора синусоидальных сигналов должны предъявляться следующие требования:

- выходное напряжение на нагрузке 600 Ом, не менее1 В;
- нестабильность частоты за 1 ч $2.5 \cdot 10^{-3} \cdot f$;
- погрешность установки частоты $2 \cdot 10^{-2} \cdot f$;
- коэффициент нелинейных искажений при максимальном выходном напряжении, не более..... 1 %.

1.2. Усилитель мощности

1.2.1. К техническим характеристикам усилителя мощности должны предъявляться следующие требования:

- неравномерность частотной характеристики в рабочем диапазоне частот не менее..... 2 дБ;
- номинальная выходная мощность для тонально-импульсного сигнала на согласованной нагрузке, не менее.....4 Вт;
- коэффициент нелинейных искажений при номинальной мощности не более..... %;
- рекомендуемый ряд нагрузок...3; 10; 100; 300; 1 000; 3 000 Ом.

1.2.2. Должна быть предусмотрена возможность плавной регулировки выходной мощности усилителя от нуля до номинального значения.

1.2.3. Должна быть обеспечена возможность работы усилителя при незаземленном выходе.

1.3. Частотомер

1.3.1. К техническим характеристикам частотомера должны предъявляться следующие требования:

- входной сигнал..... от 0,1 до 100 В;
- погрешность измерения $3 \cdot 10^{-8}$;
- нестабильность частоты за 1 ч..... $5 \cdot 10^{-8}$.

1.4. Хронизатор-модулятор

1.4.1. Хронизатор-модулятор должен работать в следующих режимах:

- тональном;
- тонально-импульсном;
- поддержания постоянства контролируемого параметра (тока, напряжения, давления).

1.4.2. Выходное напряжение и сопротивление хронизатора-модулятора должны быть согласованы с усилителем мощности.

1.4.3. Форма радиоимпульса, получаемого на выходе хронизатора-модулятора должна быть прямоугольной.

1.4.4. К характеристикам радиоимпульса предъявляются следующие требования:

- длительность от 0,1 до 50 мс;
- период повторения..... от 0 до 500 мс;
- погрешность установки длительности и периодичности не более 1 %;
- глубина модуляции не менее 90 дБ.

1.4.5. При тонально-импульсном сигнале начальная фаза несущей частоты в радиоимпульсе должна быть постоянна и не должна превышать 30° .

1.4.6. Схема хронизатора должна обеспечить зарядку строб-импульса с возможностью наблюдения положения строб-импульса на экране осциллографа приемного тракта.

К характеристикам строб-импульса предъявляются следующие требования:

- задержка от 1 до 50 мс;
- длительность от 0,08 до 50 мс.

1.5. Осциллограф

1.5.1. К техническим характеристикам осциллографа должны предъявляться следующие требования:

- неравномерность частотной характеристики в рабочем диапазоне частот не менее $\pm 1,5$ дБ;
- чувствительность 100 мВ/см;
- входное сопротивление не менее 50 кОм;
- погрешность измерения амплитуды от 5 до 10 %;
- погрешность измерения временных интервалов 10 %.

1.5.2. Осциллограф должен иметь непрерывную, ждущую, синхронную развертки.

Скорость разверток должна быть такой, чтобы можно было наблюдать 5 и более периодов исследуемого сигнала.

1.6. Компенсатор

1.6.1. Компенсатор должен обеспечивать возможность компенсации реактивной составляющей акустических приборов по последовательной и параллельной схемам замещения.

1.6.2. Значения компенсируемых параметров должны иметь следующие пределы измерений:

- индуктивностей.....от 10^{-6} до 1,5 Гн;
- емкостей..... от 10^{-12} до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ф.

2. Электрические измерительные приборы приемного тракта

2.1. Линейный усилитель

К техническим характеристикам линейного усилителя должны предъявляться следующие требования:

- неравномерность частотной характеристики не более.....0,5дБ;
- активная составляющая входного сопротивления не менее 2 МОм;
- входная емкость не более 30 пФ;
- выходное сопротивление не более 500 Ом;
- уровень помех, приведенный по входу во всем диапазоне частот не более 20 мкВ;
- динамический диапазон одной ступени не менее 46 дБ.

2.2. Логарифмический усилитель

К техническим характеристикам логарифмического усилителя должны предъявляться следующие требования:

- входное сопротивление не менее 10 кОм;
- выходное сопротивление не более 500 Ом;
- динамический диапазон при отклонении амплитудной характеристики от логарифмического закона, не превышающем $\pm 0,5$ дБ, от 20 до 60 дБ.

2.3. Фильтры

2.3.1. Комплект фильтров должен состоять из $1/3$ октавных полосовых фильтров или фильтров верхних частот и фильтров нижних частот. Частоты среза фильтров верхних частот и фильтров нижних частот должны следовать через $1/3$ октавы.

2.3.2. К характеристикам фильтров должны предъявляться следующие требования:

- затухание вне полосы прозрачности на $1/3$ октавы от границы среза не менее 40 дБ;
- неравномерность в полосе прозрачности не более 1 дБ;
- коэффициент передачи фильтров 1;
- входное сопротивление не менее 1 МОм;
- выходное сопротивление не более 600 Ом.

2.3.3. Уровень помех, вносимых фильтрами, должен быть не менее чем в 4 раза ниже уровня порогового сигнала на выходе предварительных усилителей.

2.4. Осциллограф

2.4.1. К техническим характеристикам осциллографа предъявляются следующие требования:

- чувствительность осциллографа не менее 2 мВ/см;
- выходное сопротивление не менее 1 МОм.

2.4.2. Остальные параметры должны соответствовать требованиям п. 1.5.

3. Приборы общего назначения

3.1. Измерители изоляции должны удовлетворять следующим требованиям:

- напряжения при измерениях24; 100; 500; 1 000 В;
- пределы измерения не менее 100 МОм.

3.2. Измерители сопротивлений, емкостей, индуктивностей должны иметь следующие пределы измерений:

- сопротивлений от 0,01 до 10^5 Ом;
- емкостей от 10^{-12} до 10^{-6} Ф;
- индуктивностей от 10^{-4} до 1 Гн.

Леонид Леонидович Кузьмин

**РАСЧЁТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
АНТЕНН И КАНАЛОВ**

Учебное пособие
по курсовому и дипломному проектированию
для специальности 25.05.03
«Техническая эксплуатация
транспортного радиооборудования»
всех форм обучения

Ведущий редактор Н.В. Желтухина

Лицензия № 021350 от 28.06.99.

Младший редактор Г.В. Деркач

Печать офсетная.

*Компьютерное редактирование
О.В. Савина*

Формат 60x90/16.

*Подписано в печать 12.02.2021 г.
Усл. печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 9,9.*

Заказ № 1630. Тираж 55 экз.

Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:
<http://lib.bgarf.ru/>

БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»

**Издательство БГАРФ,
член Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6.**

БГАРФ