

Л. В. Орлов, А. А. Шабров



БИБЛИОТЕКА  
ИНЖЕНЕРА —  
ГИДРОАКУСТИКА

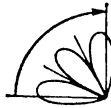
---

Л. В. Орлов, А. А. Шабров

**ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ  
АППАРАТУРА  
РЫБОПРОМЫСЛОВОВОГО  
ФЛОТА**

---





БИБЛИОТЕКА  
ИНЖЕНЕРА –  
ГИДРОАКУСТИКА

---

Л. В. Орлов, А. А. Шабров

**ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ  
АППАРАТУРА  
РЫБОПРОМЫСЛОВОВОГО  
ФЛОТА**

(РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ)



Ленинград  
„Судостроение“  
1987

ББК 32.875  
О-66  
УДК 639.2.031.7 : 681.883

СЕРИЯ «БИБЛИОТЕКА  
ИНЖЕНЕРА-ГИДРОАКУСТИКА»

---

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ А. В., БАБИЙ В. И.,  
ВАСИЛЬЦОВ Е. А., ЕВТЮТОВ А. П.,  
ИЛЬИЧЕВ В. И., КОЛЕСНИКОВ А. Е.,  
КОРЕПИН Е. А., ЛЯЛИКОВ А. П.,  
МАРТЫНЮК В. Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ В. В.  
ОРЛОВ Л. В., ПРОСТАКОВ А. Л.,  
САПРЫКИН В. А., СВЕРДЛИН Г. М.,  
СТАРКОВ А. Д.,  
ТАРАСЮК Ю. Ф. (ответственный редактор),  
ТИМОШЕНКО В. И.

**Орлов Л. В., Шабров А. А.**

О-66 Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота.— Л.: Судостроение, 1987.— (Библиотека инженера-гидроакустика).

ИСБН

Описывается организация разработки изделий. Рассматриваются задачи инженерного расчета антенн поисковых станций эхолотов и доплеровских лагов. Приводятся сведения по направленности антенн и гидрофонов с импедансными экранами конечных размеров уточненные выражения и графики для расчета пьезоэлектрических преобразователей. Описываются способы определения показателей надежности, унификации эргономики. Излагаются методы измерения параметров антенн и испытания станций в натуральных условиях. Даются примеры расчета основных характеристик станции, антенн и преобразователей.

Материалы книги могут оказаться полезными разработчикам гидроакустической аппаратуры, студентам вузов, специалистам по эксплуатации гидроакустических станций.

О  $\frac{3605030000-050}{048(01)-87}$  37—87

32.875

© Издательство «Судостроение», 1987 г.

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с широким применением гидроакустических средств на судах рыбопромыслового флота возникают задачи проектирования поисковой, контрольной и навигационной гидроакустической аппаратуры. Имеющаяся литература освещает в основном общие вопросы построения гидроакустических станций, принципы их работы, функционирование отдельных узлов. Материалы же, необходимые для инженерных расчетов приборов, практически отсутствуют, а порядок и организация проектирования рассматриваются только в ГОСТах.

В предлагаемой книге рассматриваются вопросы проектирования и расчета гидроакустических станций в целом и их основных элементов — гидроакустических антенн. Книга может оказаться полезной инженерам — разработчикам гидроакустических станций, гидроакустических антенн и преобразователей, студентам вузов и эксплуатационному составу рыбопромыслового флота. Приводятся сведения об объектах промысла, орудиях лова, судах рыбопромыслового флота, необходимые для формирования требований к гидроакустической аппаратуре.

Рассматриваются условия выбора и задания эксплуатационно-технических характеристик станций. Освещается процесс и порядок ведения разработки станций в целом и технической документации на приборы.

Главы об антеннах, преобразователях и измерениях базируются на материалах книги [35]. Они переработаны с учетом новых сведений. В частности, в гл. 2 введен раздел о направленности антенн конечных размеров и слабонаправленных гидрофонов, работающих с импедансными конечными экранами. Материал представляется полезным для разработки многоэлементных и слабонаправленных антенн. Здесь же имеются сведения для разработки антенн доплеровских лагов. В главу о преобразователях введены уточненные расчетные выражения и новые графики. Глава об измерениях расширена в части натуральных испытаний.

Предлагается материал, относящийся к определению показателей надежности, унификации и эргономике.

Книга содержит ряд примеров по ходу изложения и самостоятельную главу с расчетом основных технических характеристик станций и антенны.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Латвийского университета Гудкову В. В., Львовой Г. Е., Клиедере И. Р., выполнившим ряд расчетов.

Отзывы и замечания о книге авторы просят направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

## ВВЕДЕНИЕ

Суда флота рыбной промышленности (ФРП) оснащаются разнообразными гидроакустическими станциями. Среди них — поисковая аппаратура, приборы контроля параметров орудий лова, навигационные средства — доплеровские лаги и эхолоты. Классификация этой аппаратуры приведены на рис. В.1. Особенности схемного и конструктивного построения кратко рассматриваются ниже.

**Поисковая аппаратура. (ПА)** [1, 26, 27]. Первая попытка применения гидроакустической аппаратуры для обнаружения сельди и трески в СССР предпринята в 1938 г. на экспедиционном судне «Персей» с помощью английского эхолота. Вторая мировая война помешала дальнейшим исследованиям. В послевоенные годы они были возобновлены. Работы велись с применением зарубежной аппаратуры: эхолотов MS-ХП (Англия), Nj-8 (США), гидролокаторов «Дракон» (Англия) и отечественного «Тамир-10». Бурное развитие гидроакустической рыбопоисковой техники во многих странах, ведущих морской промысел, началось в 50-х гг.

До 60-х гг. в связи с благоприятными условиями рыболовства проектировалась простая по схемным и конструктивным решениям ПА узкоцелевого назначения. Предусматривалась она для традиционных видов промысла — поиска рыбы, обитающей на шельфах, при больших ее концентрациях. В последующие годы условия промысла ухудшались. Потребовалось существенно изменить тактико-технические и эксплуатационные характеристики ПА, в частности, для решения задач: обнаружения рыбы нетрадиционных видов (быстро перемещающейся, с незначительной отражательной способностью — тунца, акул); поиска небольших рыбных косяков; увеличения дальности и глубины действия аппаратуры, ее разрешающей способности и точности пеленгования при одновременном сокращении времени обзора и расширения площади лоцируемой акватории. Потребовалась многоцелевая поисковая аппаратура для оснащения судов, рассчитанных на автономный или экспедиционный промысел любого морепродукта в Мировом океане, на разных глубинах, при повышенных скоростях хода с применением целлагических и донных тралов, кошельковых неводов, дрейфтерных сетей, ярусов, бортовых ловушек и рыбонасосов.

Современная ПА позволяет обнаруживать рыбные скопления и определять их координаты на значительных расстояниях от судна, вы-

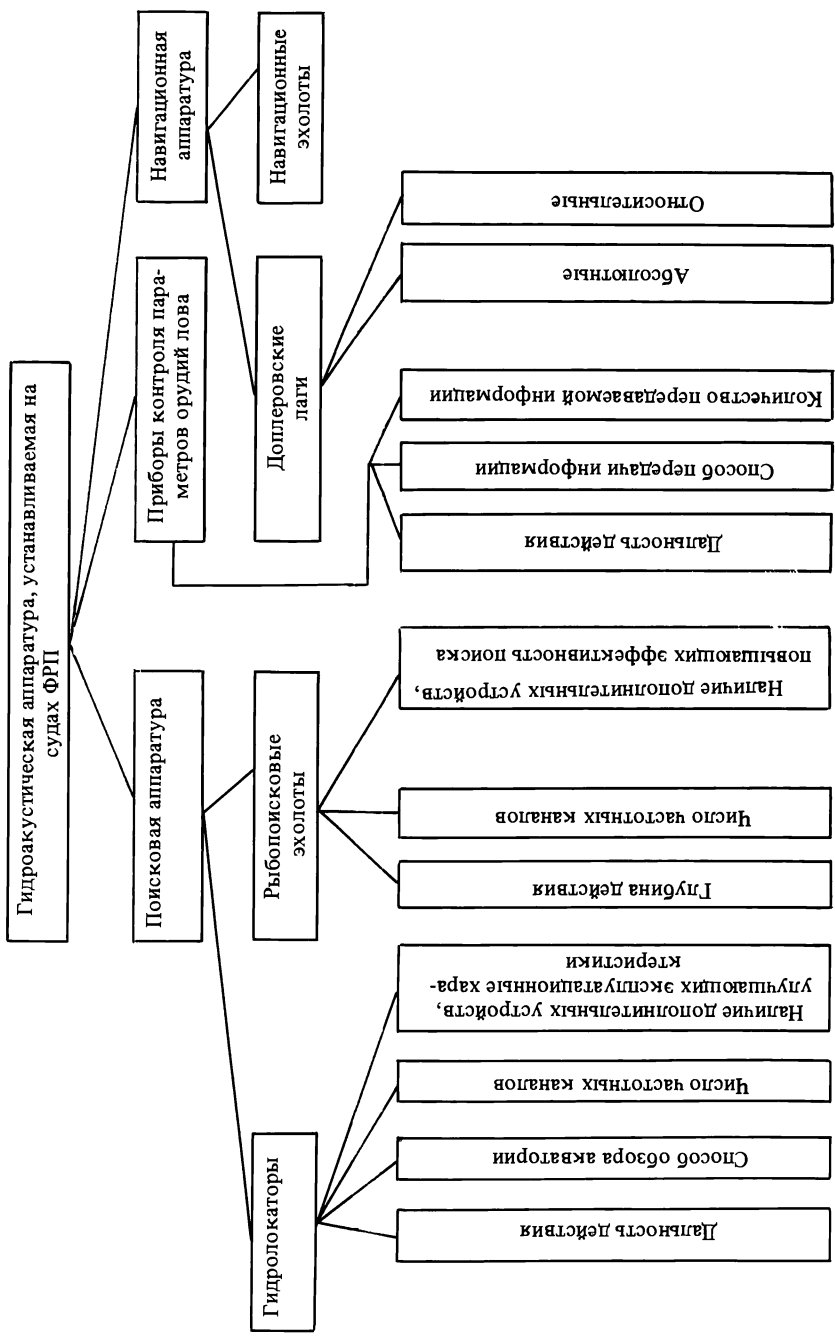


Рис. В.1. Классификация гидроакустической аппаратуры

бирать в промысловых районах места с наиболее плотной концентрацией рыбы, производить прицельный лов. С ее помощью осуществляются: перспективная разведка новых промысловых районов за пределами шельфа и в глубинах океана, оценка запасов объектов промысла, изучение их поведения и реакции на орудия лова. В начале 80-х гг. разработана аппаратура отображения подводной обстановки лова.

ПА можно систематизировать по способам ее использования и решаемым с ее помощью задачам. Среди них — станции целевого назначения и комплексы, объединяющие несколько станций, гидролокаторы, эхолоты. Станции дальнего обнаружения — низкочастотные и высокочастотные — ближнего действия с повышенной разрешающей способностью. В состав многочастотной ПА входят системы стабилизации антенн и их характеристик направленности (ХН) при качке судна; станции, акустические антенны которых расположены в буксируемом судном носителе. Применение в составе ПА систем пространственной стабилизации ХН антенн позволило при волнении моря на значительных расстояниях от судна использовать узкие, менее  $10^\circ$ , ХН, необходимые при определении точных координат и границ пеленгуемого объекта.

Системы стабилизации могут быть активными и пассивными. Пассивная стабилизация антенн основана на принципе использования гравитационного поля. Наибольшее распространение в ПА получили два типа активных систем стабилизации; механическая с электрическим, или гидравлическим, приводом и электронная. В первом случае стабилизации подвергается сама антенна, во втором — ХН. Механизм электрической или гидравлической системы стабилизации управляется от датчиков гировертикали — прибора, вырабатывающего электрические сигналы рассогласования, соответствующие амплитуде и направлению качки судна. При электронной стабилизации сигналов от датчиков гировертикали управляют очередностью и длительностью подключения того или иного преобразователя, входящего в антенну, схема построения которой при этом обеспечивает стабилизацию ХН в пространстве.

Использование в ПА буксируемых антенн придает ей ряд положительных качеств: увеличивается дальность действия за счет снижения уровня помех, на фоне которых происходит прием информации; возникает возможность вести поиск объектов промысла на различных горизонтах под слоем температурного скачка; отпадает необходимость иметь в составе аппаратуры дорогостоящую систему стабилизации; появляется возможность использования высоких частот для обнаружения объектов промысла на больших глубинах.

*Гидролокаторы.* Гидролокатор — активное гидроакустическое средство, предназначенное для получения информации по отраженному от цели сигналу. По способу обзора акватории гидролокаторы могут быть: с ручным поворотом и наклоном антенны; автоматическим шаговым (или плавным) поиском; с секторным сканированием или одновременным круговым (панорамным) обзором. При наличии у гидролокатора специфического признака принято этот признак добав-



лять к названию гидролокатора, например: двухчастотный гидролокатор с автоматическим шаговым поиском или двухчастотный гидролокатор с секторным сканированием и буксируемой антенной.

Гидролокатор с ручным поворотом и наклоном антенны. Устанавливается на малых судах, мотоботах, ведущих промысел во внутренних водоемах и прибрежной зоне. Обычно состоит из двух приборов: электронного блока и поворотно-выдвижного устройства (ПВУ) с антенной. Габариты и масса таких гидролокаторов незначительны. Рабочая частота высокая, более 50 кГц, дальность действия не более 300 м. Антенна формирует одну ХН шириной 20—30°. Потребляемая мощность не превышает 100 Вт. Поиск объектов промысла производится в секторе  $\pm 60^\circ$ . Разворот антенны ПВУ осуществляется вручную равномерно шагами с задержкой в каждом направлении на время не менее трех посылок. Шаг (по углу поворота) определяется углом раствора ХН. Быстрые и неравномерные повороты антенны затрудняют поиск, приводят к потере контакта с пеленгуемым объектом, затрудняют чтение эхограмм.

Гидролокатор с автоматическим шаговым (или плавным) поиском. Антенна излучает зондирующий импульс, переключается на приемный тракт, остается повернутой в заданном направлении в течение времени, необходимого для прохождения импульсом двойной дистанции, заданной по шкале дальности индикатора. В большинстве случаев для улучшения классификации эхосигнала требуется повторное или многократное зондирование в заданном направлении. Затем антенна автоматически поворачивается и производится посылка в следующем направлении. Угол поворота антенны (шаг поиска) определяется шириной ХН. Шаговые гидролокаторы могут вести автоматический поиск рыбных скоплений в любом секторе по желанию оператора. После окончания поиска в заданном секторе антенна автоматически возвращается в первоначальное положение.

У гидролокатора с плавным поиском антенна вращается непрерывно с постоянной скоростью. Это упрощает электрокинематическую схему привода. Во избежание пропуска объектов промысла при непрерывном вращении антенны ее ХН должна быть более широкой, чем при шаговом поиске. Такие гидролокаторы устанавливаются на судах среднего и большого водоизмещения. В связи с чем их антенны могут быть больших габаритов, с повышенным коэффициентом концентрации, по сравнению с антеннами вышеуказанных локоаторов. Недостаток гидролокаторов шагового (плавного) поиска — малая скорость обзора акватории и наличие непросматриваемых («мертвых») зон, размеры которых растут с увеличением скорости судна и при нахождении концентрации рыбы, которая определяется от нескольких посылок в заданном направлении. В случае обнаружения нескольких косяков непросматриваемые зоны еще более расширяются, так как необходимо последовательное зондирование целей и время поиска увеличивается. Усложняется и анализ целей, поскольку оператору необходимо запоминать данные об обнаруженных объектах. Это приводит к субъективности оценки. Для облегчения работы оператора

применяются устройства автоматического сопровождения цели — АСЦ. При включении АСЦ антенна вращается в заданном направлении до тех пор, пока осуществляется прием эхосигналов. В случае отсутствия эхоконтакта от трех-четырёх посылок происходит изменение направления вращения антенны, и процесс повторяется. Так осуществляется автоматическое слежение за целью.

Гидролокаторы с секторным сканированием или одновременным круговым обзором. Принцип построения этих гидролокаторов известен давно. Однако разработка таких гидролокаторов для судов ФРП стала возможной лишь с появлением микрорадиоэлементов, применение которых позволило создать аппаратуру, по габаритам и массе приемлемую для установки на рыбодобывающих судах. В общем случае работа такого гидролокатора заключается в следующем: в режиме излучения производится одновременное облучение зондирующим импульсом пространства акватории, с которой желательно получить информацию о наличии в ней объектов промысла. Сектор облучения определяется шириной ХН антенны. По углу места он составляет обычно  $10\text{--}20^\circ$ . По азимуту может быть переменным, вплоть до  $360^\circ$ . По окончании излучения зондирующего импульса акустические преобразователи антенны с помощью электронной коммутации и фазирования формируют в режиме приема узкую ХН, качающуюся в заданном секторе или вращающуюся по кругу в интервале между посылками (может быть сформирован и статический веер ХН). Тем самым осуществляется прием информации от всех объектов, находящихся в пределах зоны облучения.

В качестве регистратора эхосигналов наибольшее распространение получили электролучевые с радиальной, спиральной или многолучевой разверткой и длительным послесвечением экрана. На индикаторе воспроизводится картина промысловой обстановки в заданном секторе обзора: индицируется дистанция, курсовой угол, пеленг цели.

Некоторые гидролокаторы осуществляют зондирование сектора обзора акватории одновременно, одним импульсом. Прием осуществляется узкой ХН, которая после окончания зондирования с большой скоростью перемещается в заданном секторе. Такой режим работы способствует получению минимальной «мертвой» зоны. В этом случае для зондирования акватории необходима большая излучаемая мощность и крупногабаритное генераторное устройство. Другие гидролокаторы зондирование акватории осуществляют узким сканирующим лучом — последовательное зондирование. После окончания излучения начинается прием такой же узкой ХН. В этом случае снижается требуемая от генераторного устройства мощность, однако усложняется конструкция коммутирующих устройств и образуется увеличенная «мертвая» зона.

Иные варианты построения являются промежуточными. Имеет применение, например, вариант с одновременным излучением в трех развернутых на  $120^\circ$  направлениях со сканированием ХП. После того как каждая из трех ХН переместится на  $120^\circ$ , цикл передачи

прекратится и начнется прием вращающейся узкой ХН, как и в предыдущих вариантах. Величина «мертвой» зоны, по сравнению со вторым вариантом, в данном случае снижается в три раза, но увеличивается мощность генераторного устройства.

Могут быть и другие варианты построения. Конкретные решения в каждом отдельном случае определяются требованиями, предъявляемыми к проектируемой аппаратуре, ее назначением, необходимыми тактико-техническими и эксплуатационными задачами.

*Рыбопоисковые эхолоты* являются основными средствами для поиска объектов промысла вблизи дна. В пелагиали \* эхолоты используются для уточнения координат, обнаруженных гидролокаторами, распределений рыбных скоплений в вертикальной плоскости. Эхолоты, предназначенные для поиска объектов промысла на глубинах свыше 500 м, в большинстве случаев имеют антенны, формирующие две ХН: широкую — для локации объектов в пелагиали и узкую — в придонном слое. Эхолоты с дальностью действия не более 300 м считаются малогабаритными и предназначены для оснащения малотоннажных судов. Эхолоты с дальностью действия до 100 м обычно переносные — с автономным питанием и используются со шлюпок. Пример классификации: «высокочастотный эхолот с дальностью действия 300 м. Основным индикатором рыбопоисковых эхолотов является электромеханический самописец, а при дальности действия более 300 м применяется и индикатор электронный. Рыбопоисковые эхолоты отличаются от навигационных наличием устройств, способствующих повышению эффективности поиска. Это системы: «Белая линия», «Серая линия», «Контурная линия», «Динамический диапазон», «Дно», ВАРУ. Их назначение и принцип действия заключаются в следующем.

Система «Белая линия» позволяет производить разделение эхосигналов от рыбы и дна. Усилитель системы срабатывает только от сигналов с амплитудой, больше чем заданная. Если порог срабатывания установлен выше самого сильного эхосигнала от рыбы, но ниже сигнала от дна, усилитель автоматически отключается примерно на 0,01 с после приема донного эхосигнала. В результате этого на эхограмме появляется белый интервал, примыкающий непосредственно к записи донного сигнала. На эхограмме белые интервалы образуют «белую линию», которая воспроизводит контуры морского дна со следами эха от рыбы, различимыми над очертаниями дна. У этой системы, введенной в схемы практически всех рыбопоисковых эхолотов, имеется следующий недостаток: в зависимости от отражательной способности дна и глубины места необходима постоянная ручная регулировка срабатывания схемы. Этот недостаток может быть устранен путем введения схемы автоматического порога срабатывания. Вертикальные перемещения судна при волнении моря вызывают пропуски в записи линии дна, запись эхосигналов от рыбы искажается и распознавание их становится затруднительным. Такой недостаток частично устраняется введением в состав эхолота дополнительной системы «Серая линия».

---

\* Толща воды, среда обитания организмов, не связанных с берегом и дном.

Система «Серая линия» в отличие от системы «Белая линия» не полностью запирает входные цепи приемно-усилительного тракта, кратковременно снижая уровень переднего фронта эхосигнала от дна. При этом на ленте самописца регистрируется полоса — «Серая линия». Ширина ее регулируется в зависимости от величины вертикального перемещения судна путем изменения длительности «запирания» усилителя. В условиях вертикальных смещений судна колебания кромки серой линии, повторяющей очертания дна, практически не сказываются на качестве изображения. В этом случае эхограмма цели получается в виде более темной отметки над серой полосой.

Система «Контурная линия». В простейших схемах запись грунта на ленте самописца производится в виде убывающих по интенсивности линий, начало которых определяет глубину места в момент прихода эхосигнала от дна. В ряде случаев поиск рыбы ведется в диапазоне глубин, при которых запись от дна занимает до одной трети ширины бумажной ленты. Это увеличивает расход бумаги. Система «Контурная линия» обеспечивает запись рельефа дна в виде тонкой линии, что допускает повторное использование ленты самописца, а также существенно снижает количество угольной пыли, загрязняющей узлы самописца при использовании в нем электротермической бумаги.

Система «Динамический диапазон». При обычной записи увеличение силы эхосигналов повышает степень потемнения бумаги самописца вплоть до насыщения. При этом оказывается невозможной классификация скоплений рыбы по плотности. Система «Динамический диапазон» уменьшает амплитуды эхосигналов, величины которых превышают порог насыщения бумаги. Сильные эхосигналы после достижения определенной величины регистрируются более светлыми отметками. Наличие такого режима позволяет оператору определять зону наибольшей плотности косяка — его ядро. Это нужно для повышения эффективности облова разреженных рыбных скоплений.

Система «Дно». При поиске придонной рыбы часто пользуются электронным отметчиком (ЭО). Наибольшее распространение получили визуальные индикаторы с кадровой разверткой (с послесвечением и без него). На экране ЭО отображаются быстротекущие процессы. Изображение эхосигнала вследствие инерции зрения просматривается в форме всплесков различной толщины, амплитуды и конфигурации. Яркость изображения эхоимпульса зависит от его амплитуды. С увеличением амплитуды эхосигнала на экране ЭО яркость изображения убывает. И наоборот, малые по амплитуде эхосигналы изображаются на экране более ярко. Поэтому придонная рыба (при меньшей амплитуде эхосигнала) выделяется на фоне занимающего всю ширину экрана, не менее яркого, изображения морского дна. Однако поиск рыбы с помощью ЭО сопряжен с рядом неудобств. Необходимость постоянного наблюдения за экраном утомляет оператора. Для более успешного анализа эхосигналов придонной рыбы, изображаемых на экране ЭО, предпочтителен крупный масштаб. Но

с увеличением масштаба поискового диапазона стабильность изображений грунта и придонной рыбы нарушается: при незначительном изменении глубины (даже вследствие волнения) изображение перемещается по экрану, затрудняя тем самым наблюдения. Для стабилизации изображения эхосигналов на экране ЭО и увеличения времени наблюдения за его показаниями и разработана система «Дно». Принцип ее действия заключается в следующем. Поступающие в приемный тракт эхосигналы от рыбы и грунта подаются в блок памяти. Здесь они записываются магнитофоном и в период между посылками двух очередных зондирующих импульсов многократно воспроизводятся на экране ЭО в виде повторения одного и того же кадра. При этом генератор развертки ЭО для каждого последующего кадра запускается эхоимпульсом от грунта предыдущим кадром. К моменту приема следующих эхоимпульсов от рыбы и дна старая запись стирается и фиксируется новая, которая также с большой частотой повторения воспроизводится на экране. Благодаря послесвечению каждый эхосигнал наблюдается на экране ЭО длительное время, что позволяет более внимательно его анализировать. Изображение на экране получается стабильным — с привязкой эхосигнала от рыбы к отметке дна.

**Система ВАРУ** (временная автоматическая регулировка усиления). Предназначена для получения равных по величине эхосигналов от одинаковых по отражательной способности объектов промысла, находящихся на различных расстояниях. Она позволяет объективно оценивать показания регистрирующих приборов и принимать правильное решение по облову обнаруженных объектов промысла. Эффект достигается с помощью уменьшения коэффициента усиления приемно-усилительного тракта во времени в соответствии с ослаблением распространяющейся акустической энергии за счет геометрического расширения фронта волны и поглощения.

**Приборы контроля параметров орудий лова** [25, 27]. Приборы контроля параметров орудий лова или, как их иногда называют, сетевые зонды, относятся к телеметрической аппаратуре и предназначены для получения данных об эксплуатационных параметрах орудий лова и о подводной ситуации в зоне их действия. С помощью таких приборов обеспечивается передача на судно информации о раскрытии трала, его наполнении, отстоянии от поверхности воды и грунта, температуре в слое траления. Эти сведения необходимы для прицельного лова — решения задачи наведения находящегося на расстоянии до 3000 м от судна трала на объект, подлежащий облову. При необходимости упрощения схемы построения и конструкции сетевого зонда количество контролируемых параметров орудий лова может быть неполным. Так, например, аппаратура ИГЭК (измеритель глубины, эхолотный, кабельный) определяет только глубину хода трала или отстояние его от грунта, наличие рыбы в устье трала, под или над ним.

В состав сетевого зонда входят бортовая аппаратура и аппаратура, устанавливаемая непосредственно на верхней или нижней подбуре трала. Информация от аппаратуры, установленной на трале, может

передаваться на борт судна по кабельному или гидроакустическому каналу связи. Сетевой зонд с кабельным каналом связи наиболее прост. Он представляет собой обычный эхолот с выносной антенной, укрепленной на трале в специальном обтекателе. Антенна подключается к бортовым приборам с помощью высокопрочного кабеля длиной до 5000 м. Если расстояние от горизонта хода трала до дна не выходит за пределы дальности действия эхолота, то антенна устанавливается на верхней подборе. В случаях траления при больших глу-

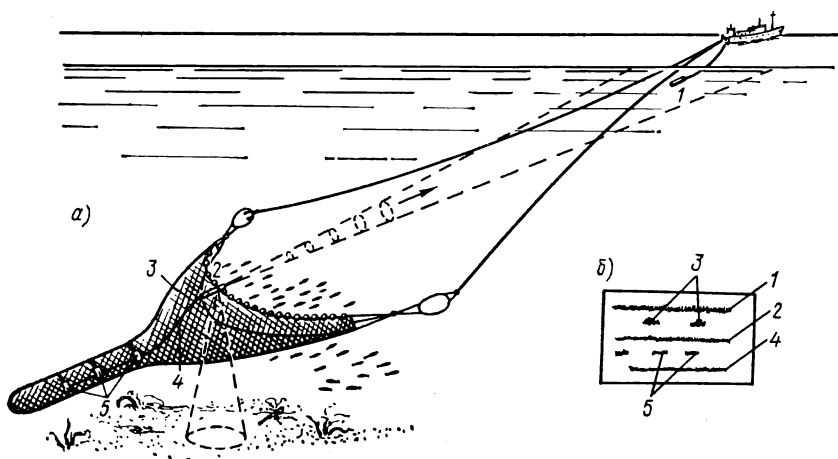


Рис. В.2. Сетевой зонд с гидроакустическим каналом связи: а — принцип действия; б — эхограмма

бинах антенна крепится к нижней подборе излучающей поверхностью вверх, и глубина хода трала определяется относительно поверхности моря. Антенна излучает зондирующие импульсы и принимает эхосигналы от различных объектов, находящихся под верхней подборой трала. Эхосигналы передаются по кабелю на судно и фиксируются самописцем. Для уменьшения потерь в кабеле эхосигнал подвергается предварительному усилению.

Наряду с определенными преимуществами — простотой реализации, возможностью передачи большого количества информации простыми средствами и высокой помехоустойчивостью, эти зонды имеют ряд эксплуатационных недостатков. Наличие кабеля большой длины и дополнительной лебедки к нему в сильной степени увеличивает габариты и массу изделия. Во избежание обрыва кабеля связи или его токоведущих жил требуется повышенное внимание обслуживающего персонала.

Зонды с гидроакустическим каналом связи (рис. В.2), как правило, являются автономными системами с собственными трактами излучения, передачи, приема и воспроизведения информации. Сбор информации в таких системах осуществляется измерительно-передающим устройством, закрепленным на верхней подборе трала 2. Принимаемая информация подвергается фазоимпульсному кодированию

или частотной модуляции и передается по акустическому каналу связи на буксируемую 1 или стационарно установленную на судне приемную антенну и далее через приемно-усилительные устройства попадает на индикаторы. Рабочие частоты трактов сбора информации — 75—200 кГц, несущая частота телеметрической линии связи — 30—60 кГц. На рис. В.2, б показана эхограмма записи информации от сетевого зонда. Запись 6 нулевой отметки соответствует верхней подборе трала. Ниже, на расстоянии, равном вертикальному раскрытию трала, зафиксирована нижняя подбора 7. Если трал проходит через косяк рыбы, то улов 8 записывается на ленте между подборами трала, а необлавливаемая рыба 9 фиксируется ниже трала. Самая нижняя отметка на эхограмме — морское дно 10.

Основное достоинство этой аппаратуры заключается в простоте обслуживания, мобильности и возможности использования на судах любого тоннажа. Основные недостатки связаны с зависимостью дальности действия от гидрологических условий и акустических помех и необходимостью применения автономных источников питания.

Измерение температуры осуществляется с помощью терморезисторов. Данные о температуре передаются по кабелю или акустическому каналу связи. Температура воды в местах лова важна, поскольку каждый вид рыбы образует промысловые концентрации лишь при вполне определенных ее значениях.

Измерение наполнения орудий лова производится дискретным методом, сущность его состоит в установлении момента, при котором происходит заполнение части или нескольких частей кутка трала рыбой. Датчики наполнения (обычно два-три) контактного типа устанавливаются на заданных расстояниях по длине кутка. Они срабатывают в момент заполнения трала (до места их установки) при определенном давлении, создаваемом рыбой, попавшей в трал. Связь датчиков наполнения с измерительно-передающим устройством осуществляется либо с помощью кабеля, либо гидроакустическим способом.

В изменчивых промысловых условиях требуется быстро оценить и законсервировать информацию о большом количестве параллельно протекающих процессов, поэтому в качестве основных индикаторов сетевых зондов применяются многоперьевые самописцы. Порядок регистрации информации самописцем определяется специальным программным устройством. При фиксировании отдельных данных, например, степени заполнения кутка трала рыбой, более удобны цифровые и светосигнальные индикаторы.

**Навигационная аппаратура.** *Доплеровские лаги* [50]. Лаг — навигационный прибор для измерения скорости движения судна и определения пройденного расстояния. Показания скорости фиксируются с помощью аналогового или цифрового прибора. Величина пройденного пути определяется интегрированием скорости по времени и регистрируется счетчиком. Метод измерения скорости основан на определении доплеровского сдвига частот в результате взаимного перемещения источника и приемника звуковых волн относительно неподвижной среды. Гидроакустические доплеровские лаги в зависимости от

опорной системы координат могут быть абсолютными и относительными, соответственно измеряющими скорость судна относительно грунта или заданного горизонта водной среды путем получения сигналов, отраженных от рассеивающих слоев.

Абсолютные лаги применяются в тех случаях, когда к точности измерений предъявляются высокие требования, например, при проводке судна (плавбазы, танкера) по каналам и фарватерам для удержания судна на рекомендованном курсе при маневрировании относительно навигационных опасностей. С появлением судов водоизмещением 100 тыс. т и более возникла задача обеспечения безопасности швартовки. Для выполнения этого требуется постоянное точное знание скорости не судна в целом как материальной точки, а отдельных его частей (носа, кормы).

Траловый промысел четко связан с обловом небольших по протяженности, но плотных скоплений рыбы на узких промысловых площадках. В таких условиях необходимо обеспечить следование траулера по строго заданной траектории, а это возможно только в случае точного определения скорости судна.

Относительные лаги используются при плавании судна в открытом море, где ошибка в выработке скорости движения судна и, следовательно, в текущих координатах может быть компенсирована периодическими обсервациями.

Отличительными особенностями доплеровских лагов являются: возможность измерения скоростей любых судов ФРП; высокая точность измерений — до 0,01 %, допустимость измерений при малых глубинах — до 0,5 м; отсутствие частей, выступающих за корпус судна; небольшие габариты и масса.

Оптимальная частота лага определяется из компромиссных условий между дальностью действия, точностью измерений и допустимыми габаритами приборов и лежит в пределах 20—1000 кГц. Чем выше частота, тем большая точность достигается при меньших размерах антенн, однако дальность действия с ростом частоты падает. Так, на частоте 300 кГц дальность не превышает 200 м, в то время как на частоте 20 кГц она может равняться 5000 м. Размеры антенны с рабочей частотой порядка 300 кГц не превышают  $0,3 \times 0,3$  м, а с частотой 20 кГц могут достигать 2—4 м. В доплеровских лагах используется как непрерывное, так и импульсное излучения. Непрерывное излучение обеспечивает наибольшую точность измерений. Этот режим работы возможен, если в составе лага могут быть использованы приемная и излучающая антенны. Такое разделение функций между антеннами допустимо, когда оказывается возможным взаимное расположение антенн, при котором существенно уменьшается прямое прохождение сигнала от излучателя к приемнику. Диапазон рабочих глубин для лагов с непрерывным излучением ограничен объемной реверберацией. При импульсном сигнале приемный тракт на время излучения заpiresается. Точность измерений в импульсном режиме ниже, а аппаратура обработки сложнее в связи с необходимостью выделения доплеровской частоты на фоне составляющих спектра импульса.



Как известно, угол раствора ХН антенны определяет полосу доплеровского спектра эхосигнала и уровень флюктуации средней частоты этого спектра. С целью увеличения точности измерения скорости ширину ХН желательнее уменьшать для сужения доплеровского спектра. Однако узкий затрудняет прием отраженного сигнала при качке судна. Для обработки сигнала требуется усложнять схему приемного тракта либо применять специальные стабилизированные антенны или их ХН в пространстве. Погрешность измерения зависит и от угла отклонения ХН от вертикального направления. Оптимальными считаются углы раствора и наклона ХН соответственно 3—6 и 30°. С целью расширения возможностей доплеровских лагов практикуется применение двух режимов их работы (непрерывный и импульсный), установка двух лагов, работающих на низких и высоких частотах. В тех случаях, когда требуется особенно высокая точность измерений (прибрежное плавание, прохождение узкостей, швартовка), используется высокая частота и непрерывный режим. Для измерения абсолютной скорости в глубоководных районах применяют низкие частоты и импульсные режимы. Точность измерений доплеровскими лагами зависит от скорости распространения звука в воде. Ошибка может достигать 7 %. Для исключения этих ошибок в одних случаях предусматриваются устройства, измеряющие скорость звука с целью коррекции вырабатываемой лагами скорости судна, в других — используются антенны, построенные таким образом, что угол наклона ХН зависит от длины волны и меняется с изменением скорости звука, тем самым исключая ошибку измерения. Основные характеристики некоторых зарубежных лагов приведены в табл. В.1.

Таблица В1. Основные характеристики доплеровских зарубежных лагов

Наименование модели	Фирма — изготовитель, страна	Режим работы	Рабочая частота, кГц	Диапазон глубины относительно грунта, м
MRQ—1030	Marquardt Corporation, США	Непрерывный	600	0,5÷75
MRQ—2010	Marquardt Corporation, США	Импульсный	300	0,3÷210
482—А	Edo Western Corporation, США	Непрерывный	455	0,5÷60
MF—100	Furuno Electric Co, Ltd. Япония	Импульсный	455	0,5÷150
JN—410	Ametecs, Япония	Непрерывный	600	0,3÷76
Altes Alpha Dalog 11	Krupp Atlas Electronic, ФРГ	Комбинированный	100	0,3÷400

*Эхолоты* [1, 51]. Относятся к числу основных приборов, входящих в состав навигационного оборудования судов ФРП. Служат для определения глубины места. Различные типы современных эхолотов позволяют измерять глубины от 0,2 до 6000 м при скоростях судна до 45 уз. Эхолоты поднадзорны Регистру СССР и должны согласно его требованиям обеспечивать измерения глубин в диапазоне от 1,0 до 500 м. Погрешность не должна превышать  $\pm 0,5$  м при глубинах от 1,0 до 20 м и 3 % на глубинах свыше 20 м. Эхолоты с диапазоном измерения глубины менее 1,0 м на судах ФРП не применяются — они используются на судах речного флота, а свыше 500 м, как правило, — на научно-исследовательских судах и считаются промерными. В последние годы для оснащения рыбопромысловых судов выпускается поисковая аппаратура, имеющая тракт навигационного режима работы, соответствующий всем требованиям Регистра СССР. Поэтому на судах, которые оснащены такой ПА, отдельные навигационные эхолоты не устанавливаются.

Принцип действия эхолота заключается в следующем: формируемые генераторным устройством радиоимпульсы подаются на антенну, преобразуются в механические колебания и в виде акустических зондирующих импульсов излучаются в воду. Отраженные от грунта акустические сигналы принимаются антенной, преобразуются в электрические, усиливаются в приемно-усилительном тракте и поступают для регистрации в индикаторные устройства. Измеряемая глубина (расстояние до грунта) определяется по промежутку времени от момента излучения импульса до момента его приема после отражения от дна. Рабочая частота, мощность и длительность зондирующих импульсов эхолота определяются пределами измеряемых им глубин. В общем случае чем на меньший диапазон глубин рассчитывается эхолот, тем выше его частота, меньше мощность и длительность импульсов. Необходимо отметить, что в эхолотах, предназначенных для измерения значительных глубин, например, до 6000 м, применяются две рабочие частоты: для измерения малых глубин — высокая, больших — низкая.

К основным приборам, входящим в состав аппаратуры эхолота, относятся: индикаторные, генераторное и усилительное устройства, одна или две антенны. В качестве индикаторных устройств применяются электромеханические самописцы, цифровые и проблесковые указатели.

Основным индикатором является самописец. В эхолотах, предел измеряемых глубин которых не превышает 500 м, самописец, генераторное и усилительное устройства, как правило, конструктивно объединяются в одном приборе, устанавливаемом в ходовой или штурманской рубке судна. У этих эхолотов акустическая система обычно состоит из двух антенн, одна из которых используется в режиме излучения, другая — в режиме приема. Антенны стационарно устанавливаются в днище судна заподлицо с его обводами в районе с наименьшим уровнем гидродинамических помех, обусловленных движением судна.

Для устойчивой (без пропусков) регистрации глубин в условиях качки судна углы раствора ХН антенны выбираются более  $20^\circ$ . В эхо-

лотах для измерения глубин свыше 500 м обычно используется одна антенна, формирующая узкую, не шире десятиградусной, ХН, стабилизированную в пространстве. В состав аппаратуры таких эхолотов дополнительно вводятся блок коммутационного устройства для автоматического переключения схем трактов излучения и приема и система стабилизации характеристики направленности.

В некоторых эхолотах с целью снижения уровня воспринимаемых гидродинамических помех антенна заглубляется за пограничный обтекающий корпус судна слой воды с помощью подъемно-выдвижного устройства. В современные навигационные эхолоты введены дополнительные схемы и устройства, повышающие безопасность судовождения и облегчающие их эксплуатацию. К ним относится прибор сигнализации об опасной глубине, обеспечивающий световую и звуковую сигнализацию о выходе судна на глубину, заранее устанавливаемую судоводителем. Принцип работы этого прибора основан на сравнении временного интервала, регистрируемого эхолотом и заданного судоводителем. При совпадении интервалов включается сигнализация.

Как известно, скорость распространения звука в воде зависит от ее температуры и солености и может колебаться от 1450 до 1550 м/с. В таких условиях погрешность измерения глубины может достигать 3%. Поэтому во всех эхолотах предусмотрено устройство корректировки показаний в зависимости от скорости распространения звука. До последнего времени введение поправок на скорость звука производилось судоводителем вручную согласно данным справочных таблиц о гидрологии района плавания судна. В последнее время разработана аппаратура для определения скорости звука в реальном масштабе времени непосредственно на ходу судна. Получаемые с ее помощью данные используются для автоматической поправки показаний эхолота.

Как уже отмечалось, согласно требованиям Регистра СССР, в качестве основного индикатора навигационного эхолота используется самописец. Существует несколько разновидностей самописцев, отличающихся формой развертки при записи информации: с прямолинейной разверткой, по окружности и спирали. Запись производится на трехслойную электротермическую (ЭТБ) бумажную ленту. Верхний слой ЭТБ состоит из смеси серы и цинка или других компонентов и обладает сопротивлением  $\sim 10$  кОм. Нижний слой металлизирован порошком алюминия для обеспечения контакта с корпусом самописца. Между этими слоями помещена бумажная масса, пропитанная угольным порошком. При подаче на ЭТБ напряжения 40—200 В верхний слой обгорает, обнажая средний темный слой. Таким образом, производится запись эхосигналов. Для облегчения отсчета на ленту автоматически наносятся координатная сетка, отметка времени, условные обозначения измерений по глубине.

Наиболее распространены самописцы с прямолинейной записью, при которой отсутствуют искажения в отображении профиля дна, неизбежные в записи по кривой. При этой системе записи (рис. В.3) электротермическая бумага 19 протягивается с помощью валиков 18,

20, 21, а эхосигнал, усиленный усилителем, через токоведущую шину 4 поступает на перо 3, установленное на бесконечной ленте 7. Электродвигатель 11 через шестерни 9, 10, 12—17 приводит во вращение протяжной валик 20, прижимной валик 21 и сматывающий барабан 18, осуществляющие протяжку бумаги, и через шестерни 9, 10 обеспечивая вращение ведущего шкива 8, на который насажена бесконечная лента с пером и магнитами 1, 5. Скорости движения пера и ленты зависят от устанавливаемого диапазона измеряемых глубин и определяются из условия получения между отметками эхоимпульсов рас-

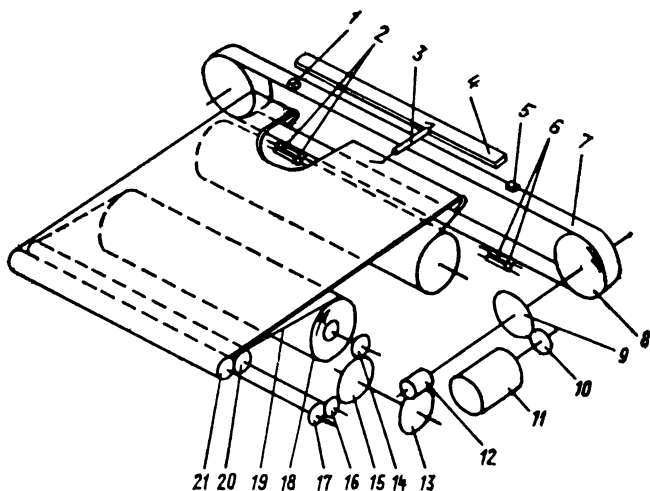


Рис. В.3. Кинематическая схема самописца с прямолинейной записью

стояния 0,3—1,0 мм. Чем меньше диапазон измеряемой глубины, тем большими должны быть эти скорости, и наоборот. Стабильность работы электродвигателя поддерживается автоматическим центробежным регулятором. Масштаб записи определяется из условия использования всей ширины бумажной ленты для выбранного диапазона измерения глубин.

Запуск генератора посылки сигнала и синхронизация работы схемы эхолота осуществляются с помощью кулачка, установленного на бесконечной ленте, или самого пера, или, как на рис. В.2, с помощью магнитов 1, 5 и магнитоуправляемых контактов 2, 6.

Для расширения диапазона записи глубин в самописцах применяется фазирование — смещение начала посылки сигнала относительно нуля записи. В этом случае на бумаге записывается участок просматриваемого диапазона глубин, начинающийся на некотором расстоянии от судна и заранее выбранный судоводителем. С этой целью на рис. В.3 количество магнитов доведено до двух, а магнитоуправляемых контактов — до четырех. Комбинируя включение магнитов и магнитоуправляемых контактов, можно получить, кроме основ-

Таблица В2. Основные характеристики навигационных эхолотов НЭЛ-М

Характеристика	НЭЛ-М1	НЭЛ-М2	НЭЛ-МЗБ	НЭЛ-МЗА	НЭЛ-М4	
Диапазоны измеряемых глубин, м	1—6000	1—3000	0,5—500	0,2—200	0,2—36	
Максимальная скорость носителя, уз	35	30	40		25	
Допустимая бортовая и килевая качки носителя, град	До 10					
	До 2—3			до 5		
Предельная погрешность измерения глубины: до 5 м	±0,3		по самописцу ±0,2		±0,1	
	5—10 м		±0,3		±0,2	
	10—20 м		±0,3			
	свыше 20 м		±1,5 % от измеряемой величины			
	до 10 м		по цифровому указателю глубины ±0,2		±0,1	
	до 20 м		±0,2			
	свыше 20 м		±1 % от измеряемой величины			
	Параметры сети питания: Напряжение В	220/127		220/127, 220		220/127
		Частота, Гц		50		50, 400
Потребляемая мощность, ВА		400	200	130	110	

ной, записи эхосигналов с тремя различными фазировками. Так как интенсивность записи пропорциональна величине подведенного к перу напряжения, а напряжение, в свою очередь, пропорционально амплитуде принимаемого эхосигнала, то по интенсивности записи можно судить до некоторой степени о структуре грунта.

Иногда на бесконечную ленту укрепляют не одно, а несколько перьев, отстоящих друг от друга на расстояния, равные (или большие) ширине рабочей части бумажной ленты. Если при этом зондирование производится при прохождении каждого пера через нуль шкалы, то можно получить большую частоту посылок при той же скорости движения ленты. Одним из основных недостатков самописцев с механической разверткой является невозможность увеличения масштаба записи из-за сложности построения кинематической схемы.

В цифровом индикаторе глубины используется принцип электронной развертки времени. Информация о глубине представляется в виде определенного числа импульсов, пропорционального временному интервалу между зондирующим импульсом и приходом эхосигнала. Счетная схема преобразует число-импульсный код в информацию о глубине, которая поступает на индикаторное табло, показывающее глубину непосредственно в метрах. В табл. В.2 приведены основные характеристики навигационных эхолотов НЭЛ-М, выпускаемые отечественной промышленностью. Они предназначены для оснащения судов различных классов и образуют унифицированный ряд: НЭЛ-М1, НЭЛ-М2, НЭЛ-М3А, НЭЛ-М3Б и НЭЛ-М4. Первые два имеют низкочастотный и высокочастотный каналы для измерений на больших и малых глубинах соответственно. Регистрация и индикация измеряемых глубин в эхолотах НЭЛ-М осуществляется самописцами и цифровыми указателями. В самописцах используется электротермическая бумажная лента с шириной рабочего поля 200 мм и длиной в рулоне  $20 \pm 2$  м. Цифровой указатель глубин может работать как совместно с самописцем, так и автономно (при отключенном самописце).

**Аппаратура отображения подводной ситуации лова.** Облов рыбных скоплений производится на основании информации, получаемой от поисковой аппаратуры, приборов контроля параметров орудий лова, лага и гирокомпаса. Однако точность наведения буксируемого на значительном расстоянии от судна (до 3000 м) трала на подлежащий облову косяк не всегда достаточна. Количество «промахов» достигает 40 %. Это объясняется сложностью решения пространственной задачи из-за быстротечности процессов. Судоводитель не успевает выполнить расчеты, необходимые для осуществления маневра встречи трала с подвижным косяком. С целью облегчения решения подобных задач используется аппаратура отображения подводной ситуации лова — так называемый дисплей. В состав дисплея входят: электронный индикатор, блоки интерфейса — сопряжения с аппаратурой, от которой вводится информация, электронно-вычислительная машина (ЭВМ). Тактико-эксплуатационные характеристики дисплея определяются объемом задач, решаемых ЭВМ. Решаемые задачи делятся на информационные и рекомендательные. Результаты решения автоматически высвечиваются на экране дисплея в виде символов или цифр. Они содержат информацию о секторе поиска, взаимном положении судна и трала, контурах рыбных косяков, других объектах в зоне действия ПА, их относительном или абсолютном перемещении. На экране отображаются координаты, скорость и курс судна, данные о трале, его расстоянии до судна, курсовом угле, степени наполнения рыбой. Наличие наглядной информации в реальном масштабе времени облегчает судоводителю контроль процесса лова и принятие оптимальных решений по маневрированию судном и орудиями лова. Объем решаемых рекомендательных задач определяется техническими возможностями ЭВМ и наличием разработанного математического обеспечения. Математическим обеспечением может быть предусмотрена, например, выдача рекомендаций (с отображением на экране индика-

тора) для кошелькового лова: по выбору начальной позиции постановки невода; по управлению судном — для выхода в начальную позицию на криволинейном участке замета, при возвращении в начальную позицию в процессе стягивания невода. Для тралового лова могут быть предложены следующие рекомендации: по наведению трала на глубину погружения косяка рыбы с учетом инерционных качеств и обеспечения устойчивости движения трала на заданной глубине с оптимальным раскрытием; по курсу траления и времени следования этим курсом до момента встречи с ядром подвижного косяка; по коррекции глубины погружения трала или курса траления с учетом текущей информации от ПА и приборов контроля орудий лова.

**ОСНОВНЫЕ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ  
И ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ  
К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

**§ 1.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Основные стадии опытно-конструкторской разработки документации и соответствующие этапы работ по созданию гидроакустических изделий (аппаратуры) определяются ЕСКД. В общих чертах последовательность разработки изделия следующая: составление и согласование технического задания на разработку; эскизное и техническое проектирование, на этапах которых разрабатывается проектная документация с присвоением ей соответственно литеры «Э» и «Т»; разработка рабочей документации для изготовления опытного образца (образцов), его изготовление и испытания, корректировка конструкторской документации по результатам испытаний с присвоением документации литеры «О»; проведение государственных испытаний; корректировка конструкторской документации по результатам государственных испытаний с присвоением литеры «О<sub>т</sub>».

Заказчик изделия разрабатывает техническое задание (ТЗ), обосновывая при необходимости содержащиеся в нем тактико-технические, эксплуатационные, экономические и другие требования в пояснительной записке. ТЗ согласовывается с разработчиком изделия и заинтересованными в применении этого изделия организациями. ТЗ может разрабатываться и разработчиком изделия на основании требований, предъявляемых к нему в заявке, сделанной заказчиком. В этом случае организация-разработчик ТЗ проводит его согласование с заказчиком и всеми заинтересованными в изделии организациями. Во всех случаях арбитрами по несогласованным между заказчиком и разработчиком и другими организациями пунктам являются утверждающие ТЗ организации. Согласованное ТЗ утверждается вышестоящими организациями заказчика и разработчика. Утвержденное ТЗ представляет собой основание для разработки изделия и технической документации к нему. Разрабатывается ТЗ на основе результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, научного прогнозирования, анализа передовых достижений и технического уровня отечественной и зарубежной техники и изучения патентной документации. В ТЗ указываются назначение, область и условия применения изделия, оговариваются его тактико-технические и эксплуатационные характеристики, приводятся показатели по надежности, технологичности, унификации и стандартизации, экономические, лимитная цена, требования по технике безопасности, транспортированию и хранению, сведения о патентной чистоте.



ТЗ не должно ограничивать инициативу разработчика при поиске и выборе им оптимальных решений поставленной задачи. ТЗ может содержать требование о разработке технических предложений.

**Технические предложения.** Технические предложения разрабатываются для выявления дополнительных или уточнения основных требований, приведенных в ТЗ на изделие. С целью выбора оптимальных схемных и конструктивных решений при проектировании изделия в технических предложениях могут быть даны рекомендации о необходимости конструкторской проработки нескольких вариантов построения изделия в целом или отдельных его частей. Техническая документация по этапу, в том числе и пояснительная записка, должна быть достаточной для проведения сравнительной оценки параметров предлагаемых вариантов. На этапе технических предложений для проверки принципиально новых решений и сопоставления различных вариантов исполнения приборов могут изготавливаться макеты с целью проведения экспериментальных проверок предложенных решений. Технические предложения рассматриваются научно-техническим советом с участием представителей заказчика.

**Эскизный проект.** Эскизный проект разрабатывается с целью выбора, проверки и отработки новых схемных и конструктивных решений проектируемого изделия. На этом этапе составляются упрощенные чертежи приборов и устройств в эскизном исполнении. Обосновываются технические решения, направленные на обеспечение тактико-технических, эксплуатационных, экономических и других требований, оговоренных в ТЗ. Проводится макетирование. Материалы эскизного проекта представляются комиссии, назначенной заказчиком. В работе комиссии участвуют представители заказчика, разработчика и организаций, согласовавших ТЗ. Результаты приемки оформляются актом, в заключительной части которого может быть приведен перечень рекомендуемых работ, направленных на уточнение или улучшение параметров, предусмотренных ТЗ. Утвержденный в установленном порядке акт служит основанием для разработки технического проекта.

**Технический проект.** Технический проект предназначается для отработки окончательных технических решений, дающих полное представление о схеме, конструкции, габаритах и массе проектируемого изделия. По согласованию с заказчиком в подтверждение принятых решений разработчик может изготавливать и испытывать макеты аппаратуры или ее составных частей. Как и на этапе эскизного проекта, материалы технического проекта представляются комиссии, назначенной заказчиком. В процессе рассмотрения технической документации комиссией производится оценка соответствия параметров аппаратуры требованиям ТЗ, ее технологичности и степени сложности изготовления, удобства эксплуатации, целесообразности и возможности ремонта, соответствия требованиям техники безопасности и производственной санитарии, способов упаковки, транспортирования и возможности монтажа на месте применения. Результаты рассмотрения материалов технического проекта оформляются актом. Как и в акте по приемке эскизного проекта, в заключительной части

при необходимости приводится перечень дополнительных уточняющих ТЗ требований для выполнения на этапе рабочего проектирования. Утвержденный в установленном порядке акт комиссии приемки технического проекта служит основанием для разработки конструкторской рабочей документации и изготовления опытного образца (опытной партии).

**Рабочий проект.** Рабочий проект выполняется с целью разработки, изготовления и испытаний опытного образца или опытной партии изделий. На этом этапе оформляется техническая документация — формуляры, описания, конструкции по настройке и эксплуатации, технические условия на изготовление и поставку, паспорта, пояснительная записка, формы протоколов испытаний, электрические и монтажные схемы, изготавливаются рабочие чертежи с полной детализацией, сборочные чертежи, ведомости спецификации, разрабатываются программы испытаний.

После этого осуществляется технологическая проработка, направленная на разработку технологии изготовления, и изделие запускается в производство. Затем блоки, узлы и приборы подвергаются проверкам и настройке по инструкциям, после чего предъявляются к испытаниям.

**Заводские испытания опытного образца.** Заводские испытания опытного образца подразделяются на предварительные (стендовые), проводимые непосредственно на предприятии-изготовителе изделия, и испытания на объекте-носителе, где предполагается его эксплуатация. Цель стендовых испытаний — проверка соответствия электроакустических параметров изделия расчетным и сохранения их после, а иногда и в процессе, механических и климатических воздействий, виды и нормы которых оговариваются в ТЗ. В этот период проверяется соответствие изделия разработанной документации. Испытания на объекте-носителе имеют целью проверку тактико-технических и эксплуатационных характеристик, оговоренных в ТЗ, в реальных условиях. Испытания осуществляются по программам и методикам, разработанным предприятием-изготовителем изделия и согласованным с заказчиком. Проводятся они комиссией, назначаемой вышестоящей организацией предприятия-разработчика изделия, с участием представителей заказчика, разработчика и организаций, согласовавших ТЗ. Председателем комиссии, как правило назначается представитель предприятия — разработчика изделия. Результаты испытаний по каждому пункту программы оформляются протоколами. На основании протоколов испытаний составляются акты по стендовым и натурным испытаниям. Во вводной части акта указывается состав комиссии, проводившей испытания. В основной — краткая характеристика изделия, его преимущества и особенности в сравнении с ранее выпускаемым, аналогичным по назначению, отмечаются выявленные схемные и конструктивные недостатки, даются рекомендации по их устранению. В заключительной части делается вывод о возможности представления изделия к следующему этапу испытаний. Утвержденный в установленном порядке акт проверки изделия на стендовых испытаниях служит основанием для представления его

после устранения выявленных недостатков по замечаниям комиссии к натурным испытаниям.

Утвержденный акт натуральных испытаний дает право разработчику после устранения выявленных недостатков по замечаниям комиссии представить опытный образец на государственные (межведомственные) испытания.

**Государственные (межведомственные) испытания опытного образца.** Цель государственных испытаний — всесторонняя проверка опытного образца на соответствие требованиям ТЗ в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации, определение возможности принятия изделия на снабжение и передачи в серийное производство. Испытания проводятся по программе и методике, разработанной заказчиком и согласованной с разработчиком аппаратуры, комиссией, назначенной вышестоящей организацией заказчика, в составе представителей заказчика, разработчика и организаций, согласовавших ТЗ. Председателем комиссии назначается представитель заказчика. Результаты испытаний оформляются актом, аналогичным акту заводских испытаний на объекте. В заключительной части акта делается вывод о возможности передачи изделия в серийное производство. Утвержденный акт государственных испытаний опытного образца служит основанием для доработки (при необходимости) технической документации и передачи ее предприятию серийного производства.

**Последовательность проектирования.** Возглавляемая главным конструктором проектируемого изделия группа инженерно-технических сотрудников отдела (лаборатории) предприятия, на котором разрабатывается изделие, производит анализ требований ТЗ, документации на ранее разработанное и находящееся в эксплуатации аналогичное по назначению изделие, в том числе выпускаемое зарубежными фирмами, знакомится с патентными материалами. По результатам анализа составляются и технически обосновываются принципиальная схема изделия и исходные данные к расчетам основных электроакустических параметров, обеспечивающих тактико-технические и эксплуатационные требования ТЗ. Производится расчет параметров. Расчет, подтверждающий обоснованность выбранной схемы, служит основанием для выдачи специализированным отделам, лабораториям или группам специалистов технических заданий на проектирование отдельных систем, приборов, блоков и узлов, входящих в состав изделия. По своему построению ТЗ специализированным отделам аналогичны ТЗ на изделие в целом. В ТЗ приводятся наименование и назначение системы, прибора, блока, стадия разработки (эскизный, технический или рабочий проекты), ориентировочная трудоемкость, срок исполнения, утверждающая подпись руководителя предприятия, отделения.

Все вопросы, возникающие в процессе проектирования, руководитель разработки прибора, блока согласовывает с главным конструктором. Разработанный и изготовленный в соответствии с ТЗ прибор (система, блок) и техническая документация к нему в объеме, определяемом действующим стандартом, предъявляются главному конструктору.

тору изделия. Специалисты отдела по разработке прибора осуществляют его настройку, регулировку на всех последующих этапах работ. При необходимости выдают задание изготовителям прибора на его доработку. Обычно специализированные отделы, например по проектированию антенн, генераторов, усилителей, индикаторов, систем привода и других устройств, находятся на предприятии, где проектируется изделие. В случае отсутствия на предприятии специализированного отдела по проектированию того или иного прибора, системы, узла предприятие заключает договор на выполнение так называемых контрагентских работ с другим предприятием.

## **§ 1.2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

Если построение принципиальной схемы гидроакустического изделия определяется методом обзора акватории, а для аппаратуры контроля орудий лова и способом передачи информации, то расчет ее основных электроакустических параметров связан в конечном счете с решением основного уравнения гидролокации. Решение этого уравнения неоднозначно. Определение входящих в него главных взаимосвязанных параметров производится путем последовательного варьирования значений, пока не будет найдено их приемлемое соотношение. Кроме выполнения поставленных технических требований, следует стремиться к нахождению оптимальных решений в части эксплуатационных, конструктивных, экономических, надежных и других показателей.

Ниже рассмотрены необходимые материалы для выбора и обоснования значений величин, входящих в уравнение гидролокации.

### **1.2.1. Носитель гидроакустического изделия**

В составе флота рыбной промышленности находится большое количество плавающих средств [6], обеспечивающих выполнение разнообразных функций. Их можно разделить на следующие группы: добывающие, обрабатывающие, приемно-транспортные, вспомогательные, специальные технические суда и подводные аппараты.

Добывающие суда предназначены для ведения промысла и обработки; обрабатывающие — только для обработки различных видов промысла; приемно-транспортные — для приемки грузов от добывающих и обрабатывающих судов непосредственно в море и транспортировки их в порты. Приемно-транспортные и обрабатывающие суда, наряду со своими основными функциями, могут осуществлять обслуживание других судов в море. К вспомогательным и специальным техническим относятся суда, предназначенные для научных рыбохозяйственных исследований, обучения кадров, охраны запасов объектов водного промысла, контроля за соблюдением правил рыболовства, мореплавания и конвенционных обязательств, а также буксиры, суда технической помощи, танкеры, сухогрузы, ледоколы, суда — носители подводных аппаратов, плавмастерские, плавкраны, плавдоки,

нефтемусоросборщики и другие суда, не участвующие непосредственно в добыче, обработке, приемке и транспортировке объектов промысла. К подводным аппаратам относятся различные устройства для исследований и выполнения рабочих операций на повышенных глубинах.

По тоннажу суда ФРП подразделяются на следующие: малотонные (не поднадзорные Регистру СССР и Речному Регистру РСФСР, в других союзных республиках — инспекция Регистра); самоходные с мощностью главного двигателя 55 кВт (75 л. с.) и несамоходные с валовой вместимостью менее 80 рег. т; малотоннажные водоизмещением в полном грузу менее 450 т; среднетоннажные водоизмещением в полном грузу от 450 до 3000 рег. т; крупнотоннажные водоизмещением в полном грузу более 3000 рег. т. Все суда оборудуются навигационными эхолотами и лагами, а добывающие, поисковые и исследовательские дополнительно поисковой аппаратурой и аппаратурой контроля орудий лова. Суда, ведущие разведку районов морского промысла, и исследовательские, как правило, оборудуются несколькими различными по назначению комплектами поисковой аппаратуры.

Для проектирования гидроакустической аппаратуры необходимо знать: максимальную скорость судна (для расчета полосы пропускания приемно-усилительного тракта, уровня помех, конструктивных элементов подъемно-выдвижных устройств); основные элементы носителя (судна)—длину  $L_{\perp}^*$ , ширину  $B_n^{**}$ , осадку  $T_0$ , поперечную метацентрическую высоту  $h_{\max}^{***}$  (для расчета параметров качки судна — периодов, амплитуд, угловых скоростей и ускорений, обоснования углов раствора ХН антенны, необходимости ее стабилизации в пространстве, размещения антенны); характеристики движителя (для определения помех); характеристики источников питания.

Максимальная скорость судна, характеристики движителя и основные элементы носителя, за исключением поперечной метацентрической высоты, определяются из спецификации судна \*\*\*\*. Поперечная метацентрическая высота — из документации по расчетам остойчивости судна \*\*\*\*\*. Периоды бортовой  $T_6$ , с, килевой  $T_k$ , с, и вертикальной  $T_v$ , с, качки (на тихой воде) рассчитываются по следующим приближенным формулам:

$$T_6 = aB_n/\sqrt{h_{\max}}; T_k \simeq 2,5 T_0; T_v \simeq 2,4 \sqrt{T_0},$$

где  $a = 0,6-0,8$  — инерционный коэффициент,  $m^{1/2} \cdot c$ .

Параметры бортовой качки: амплитуда, угловые скорость и ускорение в зависимости от периода качки  $T_6$  (на тихой воде) и волнения  $N$  (балл) акватории для судов, имеющих скуловые кили, площадь которых составляет 1—3 % от площади сечения судна по грузовой ватерлинии, определяются из графиков, приведенных соответственно

\*  $L_{\perp}$  — расстояние между точками пересечения форштевня и ахтерштевня с грузовой ватерлинией.

\*\*  $B_n$  — наибольшая ширина, измеряемая на миделе, м.

\*\*\*  $h_{\max}$  — параметр остойчивости судна.

\*\*\*\* Спецификация — основной документ, который содержит описание и характеристики устройств и механизмов судна.

\*\*\*\*\* Остойчивость — способность судна возвращаться в равновесное состояние.

на рис. 1.1—1.3. На графиках символ 3% при определяемой величине, например  $\alpha_{3\%}$ , обозначает трехпроцентную обеспеченность т. е. из 100 измерений только в трех случаях данные измерений могут превышать значения величин, определяемых по графикам.

Графики рассчитаны и подтверждены экспериментальными данными [31]. Погрешность определения значений по графикам не превышает  $\pm 5\%$ . Для судов без скуловых килей данные графиков, должны быть увеличены примерно на 10%, а для судов, имеющих скуловые кили площадью 5—6% от площади сечения судна по грузовой ватерлинии, они должны быть уменьшены на 10%. Для оценки амплитуды качки судна при заданной высоте волны ( $H_{3\%}$ ) на рис. 1.4 приведен график  $\alpha_{3\%} = (H_{3\%} T)$ . График получен путем пересчета графика  $\alpha_{3\%} = T_6 N$  в функции этих параметров, что позволяет оценить амплитуду качки судна на волнах высотой от 2 до 8,5 м. Определяемые по графикам значения величин — максимальные, они характеризуют параметры бортовой качки при положении судна лавгом к направлению движения волн на стопе. Во всех случаях, когда судно находится под другими углами к волне и при его движении, значения бортовой качки, полученные из графиков, будут меньше. В табл. 1.1 и 1.2 соответственно приведены периоды бортовой качки  $T_6$  и метацентрической высоты  $h_{\text{max}}$  для некоторых типов рыбопромысловых судов.

**Характеристика состояния водной акватории.** Группы волн. При всей кажущейся хаотичности, нерегулярности и неупорядоченности последовательно сменяющих друг друга волн в ней существует определенная закономерность: в ряду нескольких постепенно нарастающих по высоте волн проходит особенно большая, после которой следуют постепенно уменьшающиеся волны, затем картина повторяется. Издавна наибольшей волной считалась девятая и поэтому называлась девятым валом. Ранее считали такой волной четвертую, седьмую или одиннадцатую. Однако важно не то, какая волна по счету является наибольшей, а то, что волны образуют группы, состоящие из наибольшей волны и последовательно уменьшающихся по высоте

Таблица 1.1. Периоды качки судов

Тип судна	Водоизмещение, т	Период бортовой качки на тихой воде $T$ , с
Китобойное судно	1300	8,4
Рыболовные суда		
Большой морозильный траулер	2560 ÷ 5720	13,3 ÷ 20
Средний рыболовный траулер	1000 ÷ 1260	7,8 ÷ 9,3
Рыболовный сейнер	385 ÷ 464	6,9 ÷ 7,8
Средний сейнер черноморский	205 ÷ 232	5,9 ÷ 6,4
Малый рыболовный траулер	96 ÷ 123	5,2 ÷ 5,5
Малый рыболовный сейнер	75 ÷ 90	4,4 ÷ 4,7
Средний траловый бот	60	3,3 ÷ 3,6
	70	4,4

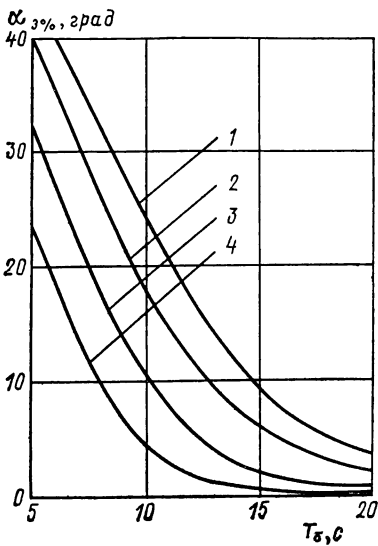


Рис. 1.1. Зависимость амплитуды бортовой качки  $\alpha_{3\%}$  от периода качки  $T_6$  (на тихой воде) и волнения акватории  $N$

1 —  $N = 7$  баллов ( $H_{3\%} = 8,5$  м); 2 —  $N = 6$  баллов ( $H_{3\%} = 6,0$  м); 3 —  $N = 5$  баллов ( $H_{3\%} = 3,5$  м); 4 —  $N = 4$  балла ( $H_{3\%} = 2,0$  м)

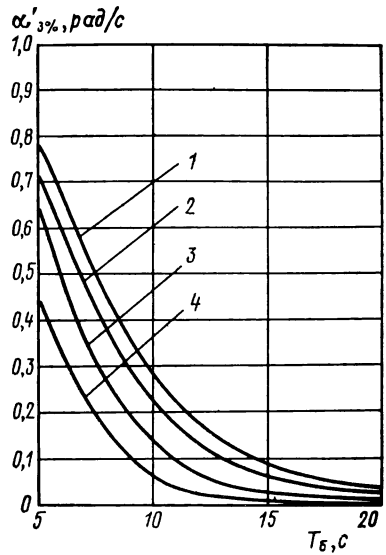


Рис. 1.2. Зависимость амплитуды угловой скорости бортовой качки  $\alpha'_{3\%}$  от периода качки  $T_6$  на тихой воде и волнении акватории  $N$

1 —  $N = 7$  баллов ( $H_{3\%} = 8,5$  м); 2 —  $N = 6$  баллов ( $H_{3\%} = 6,0$  м); 3 —  $N = 5$  баллов ( $H_{3\%} = 3,5$  м); 4 —  $N = 4$  балла ( $H_{3\%} = 2,0$  м)

Таблица 1.2. Начальная метацентрическая высота судов

Тип судна	Значение начальной метацентрической высоты судна $h_{\text{max}}$ , м		
	Порожного	При выходе в рейс со 100% запасов	При возвращении из рейса со 100% груза и минимальными запасами
Большие рыболовные траулеры:			
бортового траления	0,45—0,50	0,95—1,00	0,75—0,83
траулеры-рыбозаводы	0,25—0,40	0,75—1,35	0,30—0,40
Средние рыболовные траулеры	0,50—0,60	0,70—0,90	0,65—0,80
Малые рыболовные траулеры	1,00—1,20	0,75—0,80	0,70—0,75
Траловые боты	0,75—0,90	0,75—0,80	0,75—0,80
Сейнеры:			
большие	0,60—0,65	0,65—0,95	0,65—0,80
средние	0,60—0,65	0,65—0,75	0,65—0,75
малые	1,00—1,10	0,80—0,85	0,75—0,80
Рефрижераторы:			
производственные	0,50—0,90	0,50—0,80	0,15—0,70
транспортные	0,70—0,90	0,80—0,90	0,20—0,30

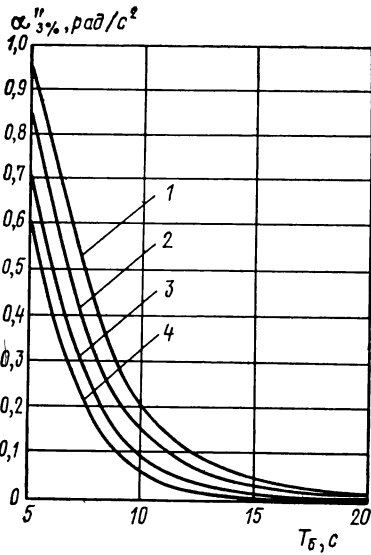


Рис. 1.3. Зависимость амплитуды углового ускорения бортовой качки  $\alpha_{3\%}''$  от периода качки  $T_6$  (на тихой воде) при волнении акватории

1 —  $N = 7$  баллов ( $H_{3\%} = 8,5$  м); 2 —  $N = 6$  баллов ( $H_{3\%} = 6,0$  м); 3 —  $N = 5$  баллов ( $H_{3\%} = 3,5$  м); 4 —  $N = 4$  балла ( $H_{3\%} = 2,0$  м)

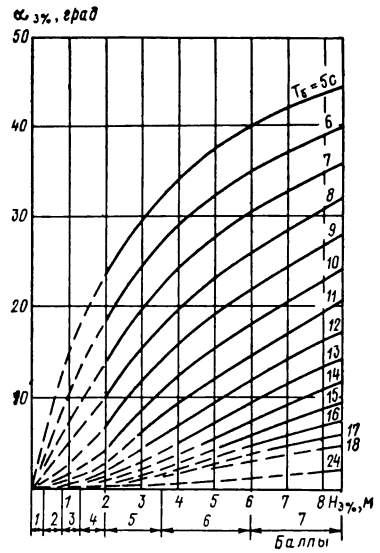


Рис. 1.4. Зависимость амплитуды бортовой качки судна  $\alpha_{3\%}$  от высоты волн  $H_{3\%}$  для различных значений периодов качки  $T_6$

волн. Групповые свойства присущи волнению различного типа (ветровому, зыби, смешанному) и не зависят от размеров и глубины акватории. В свою очередь волновой процесс зависит от интенсивности (балльности). К основным элементам, характеризующим волны, относятся: высота, период, длина, длина гребня. Согласно ГОСТу 18455—73 определения для свойств волн различного типа и их элементов следующие: *ветровое волнение* — процесс формирования, развития и распространения вызванных ветром волн; *ветровые волны* — волны, находящиеся под воздействием ветра; *зыбь* — волны, распространяющиеся в области волнообразования после ослабления или изменения направления ветра; *мертвая зыбь* — вызванные ветром волны, распространяющиеся при отсутствии ветра; *смешанное волнение* — волнение, образующееся в результате взаимодействия ветровых волн и зыби; *высота волны* — превышение вершины волны над соседней наименьшей точкой на волновом профиле; *период волны* — интервал времени между прохождением двух смежных вершин волн через фиксированную вертикаль; *длина волны* — горизонтальное расстояние между вершинами двух смежных гребней на волновом профиле; *длина гребня* — горизонтальное расстояние между двумя соседними наименьшими точками на волновом профиле.



В табл. 1.3 и 1.4 соответственно приведены шкала степени ветрового волнения и шкала зыби.

Таблица 1.3. Характеристика ветрового волнения

Баллы	Степень ветрового волнения	Размеры волн		Период, с
		высота, м	длина, м	
1	Слабое	меньше 0,25	меньше 5	меньше 2
2	Легкое	0,25÷0,75	5÷15	2÷3
3	Умеренное	0,75÷1,25	15÷25	3÷4
4	Значительное	1,25÷2,0	25÷40	4÷5
5	Сильное	2,0÷3,5	40÷75	5÷7
6	Крупное	3,5÷6,0	75÷125	7÷9
7	Штормовое	6,0÷8,5	125÷170	9÷11
8	Жесткое	8,5÷11,0	170÷220	11÷12
9	Ураганное	более 11,0	более 220	более 12

Таблица 1.4. Характеристика зыби.

Баллы	Характеристика зыби	Средние размеры волн, м		Период, с
		высота	длина	
1	Слабая	меньше 0,25	меньше 10	меньше 2
2	Легкая	0,5	15	3
3	Умеренная	1,0	30	4
4	Значительная	2,0	60	6
5	Сильная	3,0	90	8
6	Крупная	5,0	150	10
7	Штормовая	7,0	210	12
8	Жесткая	более 7,0	более 210	более 12

**Пример.** Для проектирования эхолота (навигационного, рыбопоискового), предназначенного для оснащения среднетоннажных и крупнотоннажных судов ФРП, эксплуатация которых производится при волнении акватории до 7 баллов, определить максимальные значения амплитуды бортовой качки и скорость судна.

**Решение.** Исходные данные к расчетам основных параметров эхолота для наиболее характерных типов судов сведены в табл. 1.5. Из таблицы следует; максимальная скорость судна — 15 уз: при волнении акватории 7 баллов амплитуда бортовой качки не превышает  $33\frac{1}{3}\%$ .

### 1.2.2. Объекты промысла

К основным объектам промысла [3, 53], обнаружение которых осуществляется с помощью поисковой аппаратуры, относятся большинство рыб и млекопитающие — киты (в настоящее время промы-

Таблица 1.5 Сведения о судах, необходимые для расчета гидроакустической аппаратуры

Характеристики судна	Тип судна									
	крупногоннажные					среднетоннажные				
	Супер-траулер типа В-400	Супер-траулер «Атлант-488»	БАТ типа «Горизонт»	БМТР типа «Меридиан»	РТМ типа «Прометей»	Тунцеловый сейнер	СРТМ типа «Норлинск»	СРТМ типа «Альпинист»	СРТМ типа «Маяк»	ПСРТ типа «Паланга»
Водоизмещение в грузу, т	8475	8332	7972	5720	5271	1449	1220	1137	912	550
Длина между перпендикулярами, м	107,45	107	100	94	91,8	52	49,4	46,2	50,4	29,6
Ширина, м	17,4	19	17,3	16	15,2	10,9	9,8	10,5	9,3	8,8
Средняя осадка (с учетом килля), м;	4	5	4,3	3,6	4,2	2,9	3,7	2,4	2,7	2,3
в грузу	6,6	6,5	6,5	6,5	5,1	4,9	4,5	4,5	4,4	3,5
Наибольшая поперечная начальная метacentрическая высота, м	1,0	1,25	0,73	0,85	0,99	0,95	0,7	0,96	0,91	0,67

Период наибольших переčných собственных колебаний судна на тихой воде, с	13,9	13,6	16,2	14	12,2	9	9,44	8,6	7,8	8,7	
	Вероятностные характеристики амплитуды бортовой качки 3 % обеспеченности (при положении судна лагом к волнению, без хода) при волнении моря, балл:	4	1,03	1,00	0,43	1,73	6,3	4,2	8,0	10,5	7,8
		5	3,0	3,2	1,53	3,16	5,4	11,7	15	18,2	14,3
		6	7,73	8,2	4,67	7,8	11,5	19	23	27	22,3
7	12,0	12,5	7,3	11,8	17,0	28	25,2	30	33	29	
Двигитель:	количество, ед	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		3,4	4,2	3,7	3,7	2,9	2,3	1,9	2,15	2,15	1,8
		4	4	4	4	3	4	4	3	4	4
Расчетная скорость, уз	количество лопастей, ед	16,2	15	15	15	14,6	15	11,7	13	12	
		380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
Напряжение сегн, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	

Примечание: БМТР — большой морозильный траулер-рыбозавод; РТМ — рыболовный траулер морозильный; БАТ — большой автономный траулер; СРТМ — средний рыболовный траулер морозильный; ПСРТ — пресервано-свежевой рефрижераторный траулер.

сел ограничен). Ведутся работы по использованию ПА для обнаружения антарктического криля. При проектировании гидроакустической аппаратуры необходимо знать: параметры объектов промысла, их поведение и районы обитания (для обоснования принципиальной схемы станции и методов обнаружения), скорость перемещения (для определения обусловленного эффектом Доплера полосы пропускания приемно-усилительного тракта аппаратуры), отражательную способность (силу цели).

**Рыба.** По образу жизни промысловые рыбы подразделяются на пелагические и придонные (донные). Пелагическая — рыба, большую часть жизни обитающая в толще воды; придонная (донная) — рыба, обитающая в непосредственной близости от дна.

**Стая (косяк)** — группировка рыб одного вида, близких по размерам и сходных по биологическому состоянию. Наиболее распространен стайный образ жизни у пелагических рыб, питающихся планктоном. Величина и плотность стаи зависят от размеров составляющих ее особей. Мелкие рыбы обычно образуют более плотные стаи. Численность рыб, образующих стаю, может колебаться в больших пределах. Так, например, стаи тресковых рыб состоят из нескольких десятков или сотен, а сельди из многих тысяч особей.

**Скопление** — представляет собой объединение стай и разреженной рыбы. Скопления образуются во время нагула, нереста и зимовки. Их могут составлять экземпляры разных размеров и видов. Величина и конфигурация скоплений бывают самые разнообразные.

**Разреженное скопление** — это такое скопление, в котором на рассеивающий элемент пространства в среднем приходится не более одной рыбы. Иначе говоря, почти каждая рыба регистрируется на эхোগрамме самописца ПА в виде отдельной записи. Предельная плотность скопления, регистрируемого как разреженное  $\rho_{пр} = 1/\Delta V$ , где  $\Delta V$  — объем рассеивающего элемента пространства в слое толщиной  $ct/2$  (величина  $\rho_{пр}$  является параметром ПА, характеризующим пространственную разрешающую способность;  $c$  — скорость звука в воде, м/с;  $t$  — длительность зондирующего импульса, с).

**Плотное скопление** — скопление, в котором в рассеивающий элемент пространства  $\Delta V$  попадает не менее 10 рыб. Плотность скопления при этом  $\rho_c > 10$ .

**Смешанное скопление** — скопление, плотность которого имеет промежуточное значение между плотностями разреженного и плотного скоплений:  $\rho_{пр} \leq \rho_c \leq 10$ .

Наука ихтиология рассматривает две скорости движения рыбы: максимальную и крейсерскую. Максимальную скорость рыба может развивать в течение короткого промежутка времени (не более 10 мин), уходя от опасности. Крейсерская скорость энергетически оптимальна — рыба способна выдерживать ее до 24 ч без усталости. Скорости движения рыбы в зависимости от размеров определяются по формуле [30]:  $v_p = 0,525 f_x l_p t^{-1/8}$ , где  $l_p$  — длина рыбы, м;  $t$  — время, с;  $f_x$  — частота колебаний хвостового плавника, Гц. Максимальные частоты  $f_x$  (по материалам киносъемки) для пелагической рыбы — хамсы, аберлины, королевской макрели, тунца, ставриды, скумбрии, сель-

ди — до 30 Гц. У донной рыбы (треска, пикша)  $f_x$  не превышает 14 Гц.

Отражательную способность рыб (силу цели) находят экспериментальным путем и определяют величиной обратного рассеяния  $\sigma$  как условную площадь, перпендикулярную к распространению зондирующего сигнала, создающую рассеяние, подобное реальному объекту величин.  $\sigma$  зависит от длительности и частоты зондирующего импульса, породы рыбы, ее массы и размеров, ракурса, а для стай — также от плотности распределения особей в пространстве и размеров скоплений. Экспериментально установлена зависимость сечения обратного рассеяния  $\sigma$ , длины звуковой волны  $\lambda$ , размера рыбы  $l$  [40, 57]:  $\sigma/\lambda^2 = 0,043 (l/\lambda)^{1,91}$ .

При расчетах ПА принято оперировать не значениями  $\sigma$ , а радиусом эквивалентной сферы  $R_3$ , связь между этими величинами выражается соотношением:  $R_3 = \sqrt{\sigma/\pi} = 0,117\lambda \sqrt{(l/\lambda)^{1,91}}$ .

Эквивалентный радиус  $R'_3$  для плоской стаи (в предположении отсутствия взаимодействия отраженных парциальных полей между отдельными особями, составляющими стаю, и поглощения ими энергии) определяется из выражения  $R'_3 = R_3 \sqrt{n}$ .

Эквивалентный радиус  $R''_3$  объемной стаи (с учетом взаимодействия полей от отдельных особей, составляющих стаю, и поглощения энергии) с некоторым приближением определяется из выражения:  $R''_3 = 2 (R_3 \sqrt{n})$ , где  $n$  — количество рыб, составляющих стаю, шт. (для  $n \geq 10$ ).  $R''_3$  очень плотного объемного косяка приближается к  $R'_3$  плоского косяка.

В табл. 1.6 приведены значения максимальной и крейсерской скоростей и отражательной способности пелагической и придонной рыбы в зависимости от ее длины.

**Киты** — отряд водных млекопитающих. Держатся семьями или стадами. Размеры от 1,2 до 33 м. Распространены в Мировом океане от Арктики до Антарктики. Многие киты регулярно мигрируют зимой в теплые воды для размножения, летом — в холодные для нагула жира. К промысловым видам относятся: блювал, финвал, горбач, синий, кашалот. Ниже приводится характеристика поведения китов, наблюдаемая в процессе их промысла.

**Б л ю в а л** уходит от преследования по прямой под водой. Выходит на поверхность через 3—4 мин. С продолжением погони время нахождения под водой сокращается до 1 мин.

**Ф и н в а л** уходит от преследования под водой одним курсом, делая зигзаги. Почуя опасность, выныривает на 2—3 с, делает вместо обычных трех—четырёх вдохов один вдох и занырявает.

**Г о р б а ч** — тихоходный кит. При преследовании ходит кругами. Под водой находится от 8 до 10 мин. Меняет курс в самых неожиданных направлениях.

**С и н и й к и т** держится в одиночку и попарно. Обычно делает одно длительное погружение на 5—50 мин, за которым следует серия из 5—15 всплывтий, каждое из которых длится 6—7 с, и погружений на 15—40 с. Напуганный может двигаться со скоростью 80 км/ч в течение нескольких минут.

Таблица 1.6. Скорости движения и отражательная способность рыб

Характеристика объекта промысла		В пелагиали ( $f_0 = 30$ Гц)										
		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50		
Скорость движения рыбы, м/с/уз	Длина рыб, м	Максимальная в течение, ч (с)	$\frac{1}{12}$ (300)	$\frac{1,157}{2,27}$	$\frac{1,543}{3,02}$	$\frac{1,928}{3,78}$	$\frac{2,314}{4,54}$	$\frac{2,700}{5,29}$	$\frac{3,086}{6,05}$	$\frac{3,471}{6,81}$	$\frac{3,851}{7,56}$	
			$\frac{1}{6}$ (600)	$\frac{0,708}{1,39}$	$\frac{1,063}{2,08}$	$\frac{1,417}{2,78}$	$\frac{1,772}{3,47}$	$\frac{2,126}{4,17}$	$\frac{2,480}{4,85}$	$\frac{2,835}{5,56}$	$\frac{3,189}{6,25}$	$\frac{3,543}{6,93}$
			$\frac{1}{3600}$	$\frac{0,566}{1,11}$	$\frac{0,849}{1,66}$	$\frac{1,132}{2,22}$	$\frac{1,415}{2,77}$	$\frac{1,698}{3,33}$	$\frac{1,981}{3,88}$	$\frac{2,264}{4,44}$	$\frac{2,546}{4,99}$	$\frac{2,830}{5,55}$
		Крейсерская в течение, ч (с)	$\frac{12}{43\ 200}$	$\frac{0,415}{0,81}$	$\frac{0,622}{1,22}$	$\frac{0,830}{1,63}$	$\frac{1,037}{2,03}$	$\frac{1,244}{2,44}$	$\frac{1,452}{2,85}$	$\frac{1,659}{3,25}$	$\frac{1,866}{4,06}$	
			$\frac{24}{86\ 400}$	$\frac{0,380}{0,75}$	$\frac{0,570}{1,12}$	$\frac{0,761}{1,49}$	$\frac{0,951}{1,86}$	$\frac{1,141}{2,24}$	$\frac{1,331}{2,61}$	$\frac{1,521}{2,98}$	$\frac{1,711}{3,35}$	$\frac{1,901}{3,73}$
			1	0,01	0,016	0,02	0,027*	0,03	0,037	0,04	0,047	0,05
Радиус эквивалентной сферы одиночной рыбы и стай плоской формы (на частоте 30 кГц), м		Количество рыб, шт.	10	0,032	0,05	0,063	0,085	0,095	0,117	0,126	0,148	
			100	0,1	0,16	0,2	0,27	0,3	0,37	0,4	0,47	
			500	0,224	0,358	0,447	0,600	0,671	0,827	0,894	1,051	1,118
			1000	0,316	0,506	0,632	0,854	0,949	1,170	1,265	1,486	1,581

Характеристика объекта промысла		В пелагиали ( $f_0 = 30$ Гц)		В придонном слое ( $f_0 = 12$ Гц)							
		0,60	0,70	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	
Длина рыбы, м											
Скорость движения рыбы, м/с/уз	Максимальная в течение, ч (с)	1	$\frac{4,629}{9,08}$	$\frac{5,400}{10,6}$	$\frac{0,926}{1,81}$	$\frac{1,235}{2,42}$	$\frac{1,544}{3,03}$	$\frac{1,853}{3,63}$	$\frac{2,162}{4,24}$	$\frac{2,470}{4,84}$	$\frac{3,088}{6,05}$
		$\frac{1}{6}$ (600)	$\frac{4,252}{8,34}$	$\frac{4,961}{9,73}$	$\frac{0,850}{1,66}$	$\frac{1,132}{2,22}$	$\frac{1,415}{2,77}$	$\frac{1,670}{3,33}$	$\frac{1,981}{3,88}$	$\frac{2,264}{4,44}$	$\frac{2,830}{5,55}$
	Крейсерская в течение, ч (с)	1	$\frac{3,395}{6,66}$	$\frac{3,961}{7,77}$	$\frac{0,679}{1,33}$	$\frac{0,905}{1,77}$	$\frac{1,132}{2,22}$	$\frac{1,358}{2,66}$	$\frac{1,584}{3,11}$	$\frac{1,811}{3,55}$	$\frac{2,264}{4,44}$
$\frac{12}{(43\ 200)}$		$\frac{2,488}{4,88}$	$\frac{2,904}{5,69}$	$\frac{0,498}{0,98}$	$\frac{0,664}{1,30}$	$\frac{0,830}{1,63}$	$\frac{0,996}{1,95}$	$\frac{1,162}{2,28}$	$\frac{1,328}{2,60}$	$\frac{1,660}{3,25}$	
Радиус эквивалентной сферы одиной рыбы и стай плоской формы (на частоте 30 кГц), м	100	24	$\frac{2,282}{4,47}$	$\frac{2,662}{5,22}$	$\frac{0,456}{0,89}$	$\frac{0,608}{1,19}$	$\frac{0,760}{1,49}$	$\frac{0,912}{1,79}$	$\frac{1,064}{2,08}$	$\frac{1,216}{2,38}$	$\frac{1,520}{2,98}$
		1	0,06	0,07	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1
	500	1,342	1,565								
Количество рыб, шт.	1000	1,897	2,213								
	10	0,190	0,221								

**К а ш а л о т.** Самый крупный из зубатых китов. Нырять на глубину до 1000 м. Вынырнув после длительной глубоководной кормежки, обычно лежит без движения в течение 10—15 мин.

При охоте на китов максимальная дистанция гарпунирования составляет 70—80 м, минимальная — 30 м. По экспериментальным и расчетным данным радиус эквивалентной сферы составляет: для блювала длиной 20 м — 1,0 м; для финвала длиной 18 м — 0,9 м; для кашалота длиной 13 м — 0,65 м.

**Антарктический криль** обитает вокруг Антарктиды. Его промысловые запасы во много раз превышают запасы рыбы. Изучение криля как объекта промысла выявило следующие закономерности: во время антарктических весны, лета и осени с декабря по май криль ведет стайный образ жизни. Скопления криля образуются в зонах стыка течений, завихрений и смещения водных масс, отличающихся физико-химическими характеристиками. Скопления криля устойчивы и перемещаются медленно. В течение летнего сезона объектом промысла могут быть два поколения криля: молодь, живущая второе лето, и половозрелый криль, живущий третье лето. Результаты массовых промеров показали, что размеры криля колеблются от 40 до 65 мм, причем наибольшее количество рачков имеют размеры 48—54 мм. Масса одного 1—2,5 г. Отсутствие у криля плавательного пузыря позволяет утверждать, что отражательная способность скопления криля несколько меньше, чем у сопоставимого по площади, объему и плотности скопления рыбы. Криль образует два вида скоплений: на глубинах до 60 м и приповерхностные, наблюдаемые визуально в виде красно-бурых пятен. Первый вид скоплений облавливается разноглубинными тралами при тралении на прямых курсах судна со скоростью 3,3—3,4 уз. При работе в качестве орудий лова иногда используются тралы с рыбонасосами или бортовые ловушки. Поверхностные скопления криля облавливаются теми же тралами, но буксировка их осуществляется по пологой циркуляции судна (при тралениях на прямых курсах судно рассекает поверхностные скопления криля на две части и трал проходит по «чистой» воде). В этих случаях криль облавливается при скорости буксировки 1,6—2,8 уз.

### 1.2.3. Орудия лова

К основным видам орудий лова относятся: тралы, дрейферные сети, кошельковые неводы, яруса, ловушки для крабов и креветок.

Информация необходима для расчетов технических и конструктивных характеристик приборов контроля параметров орудий лова.

**Тралы.** Представляют собой сетные мешки, буксируемые за траулером при помощи двух стальных тросов. В зависимости от горизонта лова по конструктивному выполнению тралы могут быть донными, придонными и разноглубинными. Отличительная особенность работы донного трала от других заключается в том, что при тралении он движется, прижимаясь к грунту, следуя всем его неровностям. На рис. 1.5 приведено схематическое изображение донного трала.



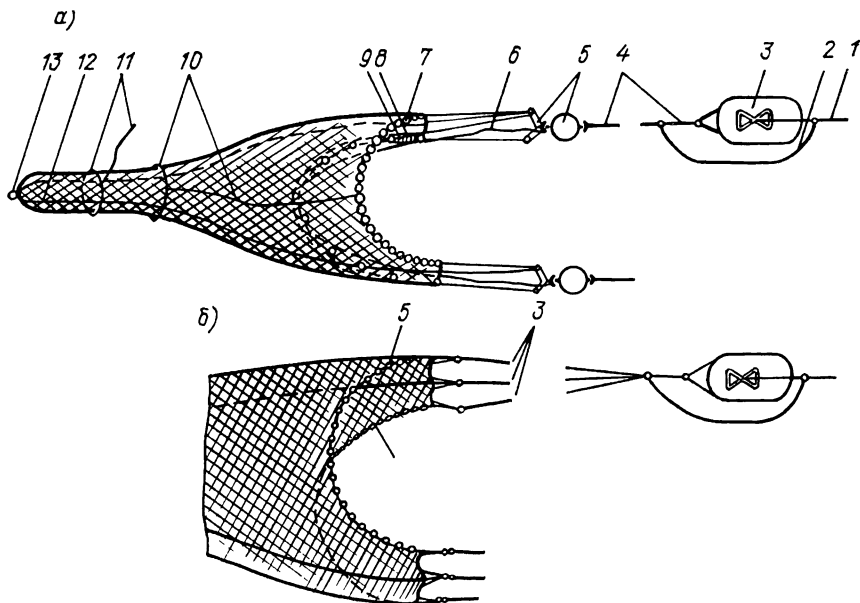


Рис. 1.5. Схематическая конструкция донного трала

1 — ваер; 2 — переходный конец; 3 — распорная доска; 4 — кабель; 5 — клячечка с бобинцем; 6 — квартроп; 7 — верхняя подбора с кухтылями; 8 — нижняя подбора; 9 — грунтроп; 10 — уловный строп с линем к нему; 11 — дележный строп с линем к нему; 12 — топенант и пожилины; 13 — гайтян

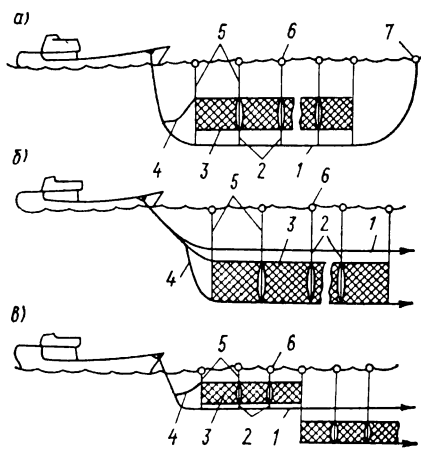


Рис. 1.6. Типы дрейферных «порядков»: а — с нижним положением вожака, б — с верхним положением вожака; в — комбинированный

1 — вожак; 2 — вожачковые поводцы; 3 — дрейферные сети; 4 — канат для подтягивания верхней или нижней подборы; 5 — буйковые поводцы; 6 — буйки; 7 — концевой буй

**Дрейферные сети** применяются для лова пелагических скоплений рыбы. Промысел с их помощью носит пассивный характер. Они соединяются между собой в так называемый порядок, который при помощи каната (вожака) крепится одним концом к судну, и дрейфуют вместе с ним под влиянием ветра и течения. Длина дрейферного порядка от 60 до 120 м, число сетей в нем зависит от погоды, концентрации рыбы, водоизмещения судна и глубины лова. Так, например, на промысле сельди в весенне-летний период, когда косяки сельди держатся близко к поверхности на глубинах до 25 м, порядок состав-

ляют из 120—150 сетей; в осенний период сельдь держится на глубинах 40—50 м, и количество сетей в порядке уменьшается до 100—120 шт; в зимний период сельдь опускается еще ниже и порядок составляет 70—80 шт. Поддержание дрефтерного порядка на плавцу и контроль за его положением осуществляются при помощи дрефтерных и концевых буев. На рис. 1.6 приведены дрефтерные порядки и принятые в рыболовстве наименования их составных частей.



б)

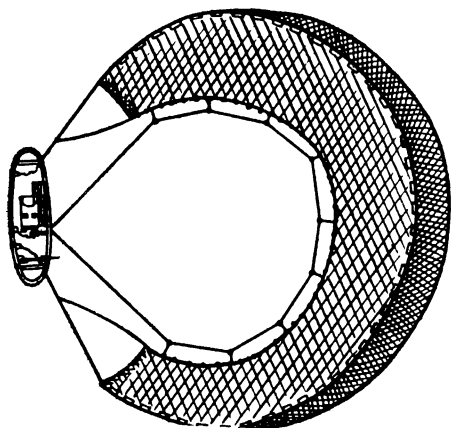


Рис. 1.7. Замет кошелькового невода; а — начало замета; б — окончание замета

**Кошельковые неводы** — обкидные отцеживающие орудия обычно в форме прямоугольников длиной, в несколько раз превышающей высоту. Косяк окружается неводом, и невод стягивается, образуя кошель. Минимальная высота невода, при которой возможно правильное кошелькование, составляет 10 % от его длины. На рис. 1.7 показан замет кошелькового невода.

**Яруса** — крючковые снасти в виде тонких шнуров, по всей длине которых на подводцах прикреплены крючки. Ярусный порядок, имеющий длину от 1 до 160 км, состоит из 50—400 метровых секций. По способу установки ярусные порядки делятся на стационарные и дрейфующие.

Стационарные ярусные порядки устанавливаются на якорях, применяются для лова в прибрежной полосе малыми судами. Дрейфующие получили распространение при морском и океаническом промыслах на больших глубинах, когда применение якорей затруднено. Стационарные яруса устанавливаются как в придонном, так и приповерхностном положениях и могут располагаться наклонно к горизонту. Ярусный лов, например, тунцов наиболее успешно ведется на глубинах до 160 м.

В табл. 1.7 приведены сведения об орудиях лова, которые могут интересовать разработчика ПА.

#### 1.2.4. Сила цели (СЦ)

Сила цели характеризует отражательную способность объекта пеленгования, зависит от его конфигурации и свойств — поглощения, отражения и рассеяния акустических волн, необходима при расчетах энергетической дальности действия гидроакустической аппаратуры, измеряется в децибелах:  $СЦ = 10 \lg I_2/I_1$ , где  $I_1$  и  $I_2$  — соответст.

Таблица 1.7. Параметры орудий лова

Тип судна	Тралы						Кошельковые невода							
	Раскрытые трала, м		Длина ваеров, м		Глубина хода, м		Длина, м		Ширина, м		Скорость выметки, м/с			
			мин	макс	мин	макс								
	Горизонтальное	Вертикальное	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс		
макс													мин	макс
Крупнотоннажные	30	150	30	150	100	1000	0	1500	—	—	—	—		
	20	60	5	60	100	2000	0	1000	560	2000	60	280		
	15	60	5	50	50	2000	0	1000	440	628	53	85		
Среднетоннажные	Дрифтерные сети													
	Размеры, м						Глубина погружения подборы, м						Количество сетей, шт.	
	по вертикали		по горизонтали				верхней		нижней					
мин			макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс	
Среднетоннажные и малотоннажные	5,6	10,0	30,0	50,0	0	100	5,6	100	5,6	100	—	150		

венно интенсивности волны, падающей на цель, и отраженной волны на единице дистанции от центра цели.

В связи с тем, что размеры, конфигурация и физические свойства объектов весьма разнообразны, расчет уровня интенсивности эхосигналов от них представляет значительные трудности, а порой оказывается невозможным. Поэтому все объекты пеленгования принято заменять эквивалентными по отражательной способности искусственными целями простейших форм, расположение которых на место пеленгуемого объекта, создает в точке приема такой же по амплитуде сигнал, как и сам объект.

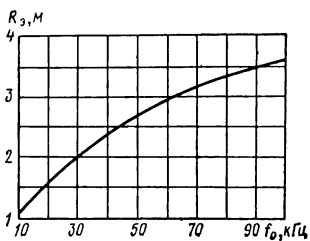


Рис. 1.8. Зависимость радиуса эквивалентной сферы от частоты

лей) сферы. При  $R_э > 0,5$  м используют углоковый отражатель. Проверка аппаратуры по искусственным целям более объективна по сравнению с проверкой по целям естественным и позволяет сделать правильное заключение об уровне поисковых качеств проверяемой аппаратуры. Проверка по искусственным целям освобождает испытателей от выхода судна в промысловые районы, поиска объектов пеленгования и допускает проведение испытаний в непосредственной близости от места базирования.

В процессе проектирования и проверки гидроакустической аппаратуры, работающей на частоте, отличной от той, при которой производилась калибровка искусственной цели, ее эквивалентный радиус с достаточной для инженерных расчетов точностью определяют из выражения  $R_э = R_{э0} \sqrt{f_p/f_0}$ , где  $f_0$  — частота (кГц), на которой определялся радиус эквивалентной цели ( $R_{э0}$ , м);  $f_p$  — рабочая частота аппаратуры, кГц. При расчетах и проверке ПА, предназначенной для поиска отдельных рыб и рыбных скоплений, в качестве эталона соответственно приняты искусственные цели с радиусами эквивалентной сферы  $R_э = 0,1$  м и  $R_э = 2$  м с проведением измерений на частоте 30 кГц. График зависимости  $R_э = f(f_p)$  приведен на рис. 1.8. Отражательная способность объектов неограниченных размеров — рассеивающих слоев, поверхности и дна моря — характеризуется коэффициентом обратного рассеяния, величина которого зависит от угла падения акустических волн, материала и структуры рассеивателя. При нормальном падении звуковой волны коэффициенты обратного рассеяния равны: от ила — 0,1, от песка — 0,3, от гранита — 0,6 и от границы вода—воздух — 1.

### 1.2.5. Зона действия

Зона действия относится к одному из основных параметров ПА и определяет ее тактико-эксплуатационные характеристики. Представляет собой область водного пространства, ограниченную наиболее удаленными от оси ХН антенны участками, от которых регистрируется пороговый эхосигнал от объекта пеленгования. При оптималь-

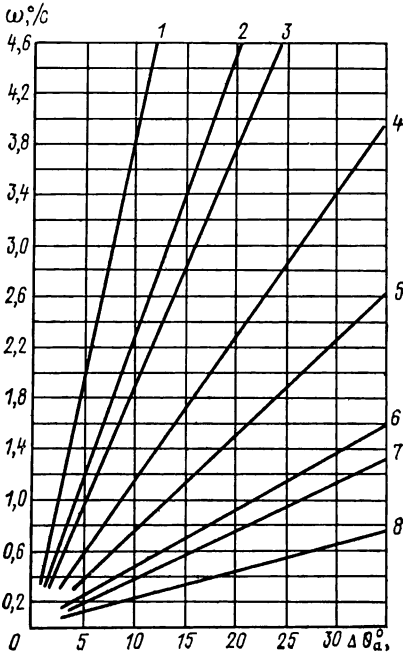


Рис. 1.9. Зависимость угловой скорости вращения антенны от угла раствора ХН

1 —  $L = 1000$  м,  $K = 0,5$ ; 2 —  $L = 1000$  м,  $K = 0,7$ ; 3 —  $L = 2000$  м,  $K = 0,5$ ; 4 —  $L = 2000$  м,  $K = 0,7$ ; 5 —  $L = 5000$  м,  $K = 0,5$ ; 6 —  $L = 5000$  м,  $K = 0,7$ ; 7 —  $L = 10000$  м,  $K = 0,5$ ; 8 —  $L = 10000$  м,  $K = 0,7$

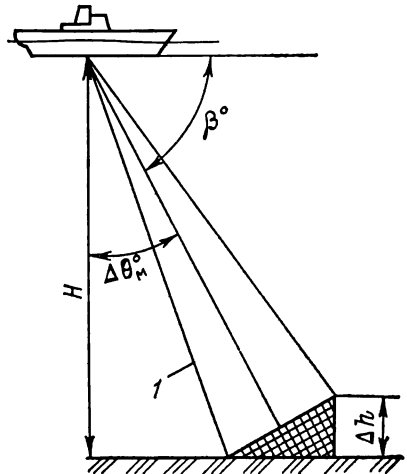


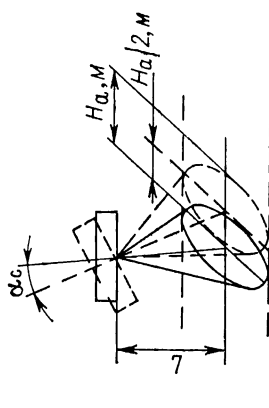
Рис. 1.10. К определению мертвой зоны при локации придонной рыбы

ных электроакустических параметрах аппарата и принятых при ее расчетах отражательной способности объектов пеленгования площадь (объем) зоны действия с достаточной для инженерных расчетов точностью определяется углами раствора ХН антенны (сектором сканирования) и шкалой дальности действия аппарата. Формулы для расчетов зоны действия поисковой аппаратуры в пелагиали приведены в табл. 1.8.

В табл. 1.9 сведены рассчитанные по формуле (7), приведенной в табл. 1.8, значения минимально допустимых углов раствора ХН антенн (без устройства, стабилизирующих их в пространстве при качке судна) в зависимости от шкалы дальности действия аппаратуры  $L$ , углов и периодов качки судна  $\alpha_c$  и  $T$ . На рис. 1.9 приведены графики, иллюстрирующие изменение величины угловой скорости вращения однолепестковой ХН антенны в зависимости от ее раствора при различных значениях коэффициента перекрытия зон поиска  $K$ . Расчет графиков произведен по формуле (13), приведенной в табл. 1.8.

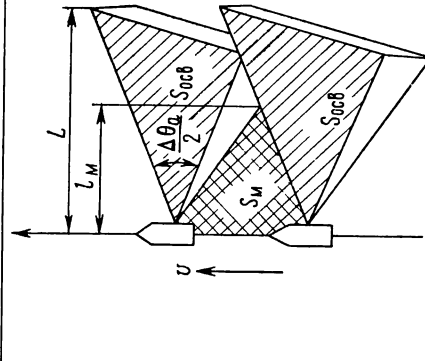
Таблица 1.8. Зоны действия поисковой аппаратуры

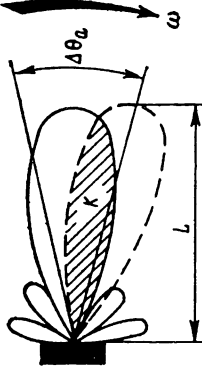
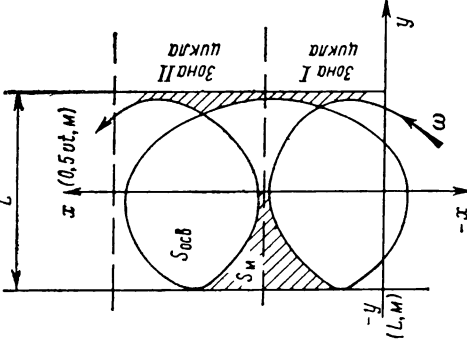
Определяемая величина	Расчетные выражения	№ формулы	Схематическое изображение
<p>1. Плоскость, перпендикулярная направлению распространения акустических волн. Носитель антенны неподвижен</p> <p>Ширина зоны в азимутальной плоскости <math>H_a</math>, м</p>	$H_a = 2L \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_a}{2}$	(1)	
<p>Ширина зоны в угломестной плоскости <math>H_m</math>, м</p>	$H_m = 2L \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_m}{2}$	(2)	
<p>Площадь освещаемой зоны симметричной характеристической направленности <math>S</math>, м<sup>2</sup></p>	$S = \pi L^2 \left( \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_a}{2} \right)^2$	(3)	
<p>Площадь освещаемой зоны несимметричной характеристической направленности <math>S</math>, м<sup>2</sup></p>	$S = \pi L^2 \left( \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_a}{2} \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_m}{2} \right)$	(4)	
<p>Объем освещаемой зоны <math>V</math>, м<sup>3</sup></p>	$V = \frac{1}{3} LS$	(5)	
<p>Расстояние до объекта поиска по горизонтالي <math>L_0</math>, м</p>	$L_0 = L \cos \beta$	(6)	

<p>Минимально допустимый угол раствора нестабилизированной характеристики направленности облучаемой антенны (при условии перекрытия 1/2 освещаемой зоны, характеристикой направленности) <math>\Delta\theta</math>, град</p>	$\Delta\theta \geq \frac{\alpha_c \cdot L}{T \cos \alpha_c} \cdot 10^{-2} \quad (7)$	
	$T = \frac{aB_c}{\sqrt{H_c}} \quad (8)$	

II. Горизонтальная плоскость. Носитель антенны движется прямолинейно с постоянной скоростью

1. Боковой обзор акватории (излучение и прием по траверсу)

<p>Ширина освещаемой зоны <math>H_a</math>, м</p>	$H_a = L \quad (9)$	
<p>Протяженность мертвой зоны между двумя посылками <math>l_M</math>, м</p>	$l_M = \frac{0,5vL}{c} \operatorname{ctg} \frac{\Delta\theta_a}{2} \quad (10)$	
<p>Площадь мертвой зоны между двумя посылками <math>S_M</math>, м<sup>2</sup></p>	$S_M = \frac{0,25v^2L^2}{c^2} \operatorname{ctg} \frac{\Delta\theta_a}{2} \quad (11)$	
<p>Площадь освещаемой зоны от двух посылок <math>S_{осв}</math>, м<sup>2</sup></p>	$S_{осв} = \frac{vL^2}{c} + L^2 \operatorname{tg} \frac{\Delta\theta_a}{2} - \frac{0,25v^2L^2}{c^2} \operatorname{ctg} \frac{\Delta\theta_a}{2} \quad (12)$	

Определяемая величина	Расчетные выражения	№ формулы	Схематическое изображение
Угловая скорость вращения антенны $\omega$ , %	$\omega = 750 \frac{\Delta\theta_a}{L} (1 - K)$	(13)	
Параметрические уравнения кривой, ограничивающей освещаемую площадь	$x = 0,5\omega t + L \sin \omega t$ $y = L \cos \omega t$	(14)	
Условие перекрытия освещаемых зон поиска при двух смежных циклах	$\omega \geq \frac{3\pi 0,5\omega \cdot 180}{2L\pi} = 135 \frac{v}{L}$	(15)	
Отношение «мертвой» площади к освещаемой $K_2 = \frac{S_m}{S_{осв}}$ , %	$K_2 = \frac{90}{\pi} \frac{v}{L\omega} = 28,6 \frac{v}{L\omega}$	(16)	

Примечание.  $L$  — шкала дальности действия, м;  $\Delta\theta_a 0,7$  — угол раствора ХН антенны в азимутальной плоскости, град;  $\Delta\theta_m 0,7$  — угол раствора ХН антенны в угломестной плоскости, град;  $\beta$  — угол наклона к горизонтальной плоскости ХН, град;  $\alpha_c$  — угол качки судна, град;  $T$  — период качки судна, с;  $a$  — инерционный коэффициент судна ( $a = 0,6 - 0,8$ );  $B_c$  — ширина судна, м;  $H_c$  — поперечная метacentрическая высота судна, м;  $V$  — скорость хода судна, уз;  $c$  — скорость распространения звука в воде, м/с (в расчетах = 1500 м/с);  $K$  — коэффициент перекрытия зон поиска.



Ширина зоны поиска, из которой может быть получена информация о наличии рыбы в придонном слое, для ПА вертикального действия при антенне с однолепестковой ХН определяется по формуле, предложенной Юдановым К. И.:

$$H = \sqrt{8\Delta h H'}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta h$  — расстояние объекта пеленгования (рыбы) от дна;  $H$  — глубина места, м.

Из формулы (1.1) следует, что ширина зоны поиска не зависит от угла раствора ХН антенны. Практически значение величины  $H$  несколько меньше расчетного, так как выражение (1.1) выведено из

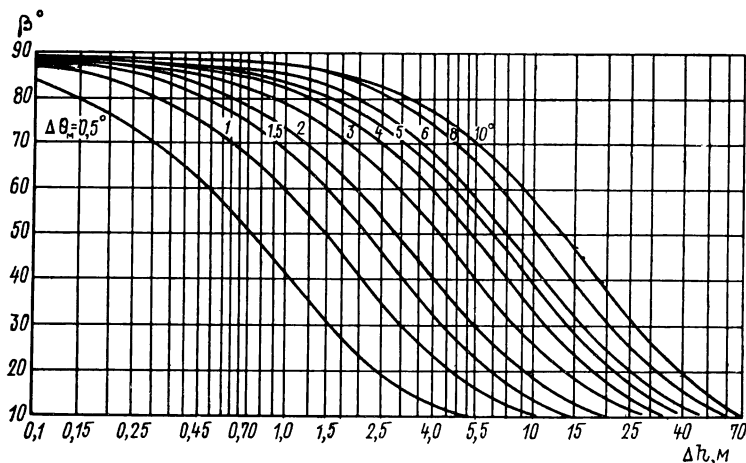


Рис. 1.11. Функциональная связь высоты мертвой зоны  $\Delta h$  с углами раствора  $\Delta\theta_{0.7}$  и наклона  $\beta$  характеристики направленности

предположения падения сферической волны на гладкую поверхность. Сужение зоны поиска обусловлено неровностями дна, вызывающими реверберацию, маскирующую полезный сигнал. Чем больше неровность дна, тем значительней реверберация и уже зона поиска.

Несколько иная картина наблюдается при поиске в придонном слое рыбы, находящейся в стороне от судна, с помощью ПА горизонтального действия. На рис. 1.10 показано распространение акустической волны при излучении под углом к горизонту. В этом случае энергия, движущаяся по кратчайшему пути  $l$ , достигая дна, вызывает реверберацию, усиливающуюся по мере достижения дна другими участками фронта волны. В результате образуется заштрихованная область (мертвая зона), в которой невозможно обнаружить рыбу. Высота мертвой зоны  $\Delta h$  может быть определена с помощью выражений  $\Delta h = 2H' \sin(\Delta\theta_m/2) [\cos\beta / \sin(\beta + \Delta\theta_m/2)]$  при  $0 < \beta < 90 - (\Delta\theta_m/2)$ ;  $\Delta h = H' [1 - \sin(\beta - \Delta\theta_m/2)]$  при  $90 > \beta > 90 - (\Delta\theta_m/2)$ , где  $\Delta\theta_m$  и  $\beta$  — углы раствора и наклона ХН антенны соответственно.

На рис. 1.11 приведены рассчитанные по вышеприведенной формуле зависимости, связывающие высоту мертвой зоны с углами на-

Таблица 1.9. Зависимость ширины нестабилизированной характеристики направленности от дальности действия аппаратуры и периода качки судна

$T_c$	$\alpha_c$	Дальность действия $L$ , м															
		25	50	100	300	500	700	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	7000	10000
3	5			1,7	5,3	8,9	12,5	17,8	21,4	26,7	35,7	44,5	53,5	71,3			
	10		1,8	3,6	10,8	18,0	25,7	36	43,3	54	72						
	15		3	5,5	16,5	27,6	38,6	55	66,2	82							
	20	2	3,8	7,5	22,7	37,8	56	75									
	25	2,5	5	9,8	29	50	68										
	30	3	6,2	12,3	37												
5	5			1	3,2	5,3	7,5	10	12,8	16	21,4	26,7	32	42	53	75	
	10		1	2,1	6,5	10,8	15,1	21	26	32,5	43,3	54	65				
	15		1,6	3,3	10	16,5	23,1	33	40	50	66						
	20	1,2	2,3	4,5	13,6	22,7	31,7	45	54,4	68							
	25	1,5	3,0	5,8	17,6	29,4	41,2	58	70,6								
	30	1,8	3,7	7,4	22	37	51,7	74									
7	5				2,3	3,8	5,3	7,6	9,2	11,5	15,3	19,1	23	30,6	38,2	53,5	76
	10			1,5	4,6	7,7	10,8	15	18,5	23,2	31	38,6	46	61,9	77		
	15		1,2	2,3	7	11,8	16,5	23	28,4	35,5	47,3	59	71				
	20		1,6	3,2	9,7	16,2	22,7	32	39	48,6	64,8						
	25	1	2,1	4,2	12,6	21	29,4	42	50,4	63							
	30	1,3	2,6	5,2	15,8	26,4	37	52	63								



клона и раствора ХН при глубине места 100 м. Значение  $\Delta h$  для  $H = 200, 300$  м и других находят умножением  $\Delta h$  при  $H = 100$  м на числа 2, 3, 4 и т. д. Из приведенных графиков следует, что обнаружение наклонным лучом рыбы вблизи грунта возможно лишь гидролокатором, имеющим антенну, формирующую узкую ХН. Для увеличения зоны и скорости поиска в придонном слое в современной рыбопоисковой аппаратуре применяют антенны, формирующие веер остро-направленных ХН.

В случае применения одной или нескольких остронаправленных ХН они должны быть стабилизированы в пространстве, иначе получить на индикаторах устойчивую информацию об объектах пеленгования невозможно. Из графиков следует, что для обнаружения наклонным лучом рыбы вблизи грунта на глубине более 500 м необходима антенна, формирующая ХН шириной менее  $1^\circ$ .

Для глубинного поиска и малотоннажных судов целесообразнее проектировать рыбопоисковую аппаратуру с антеннами, расположенными в буксируемых устройствах. При этом исключаются устройства стабилизации ХН в пространстве от качки судна, появляется возможность обнаружения рыбы под слоем температурного скачка.

### 1.2.6. Скорость звука.

#### Коэффициент пространственного затухания

Скорость звука зависит от упругости воды и плотности и определяется выражением  $c = \sqrt{E/\rho}$ , где  $E$  — модуль упругости;  $\rho$  — плотность. Произведение  $\rho c$  называется волновым или акустическим сопротивлением среды.

Так как модуль упругости и плотность воды изменяются в зависимости от температуры, солености и гидростатического давления, скорость звука в воде величина не постоянная, она растет с увеличением температуры, солености и давления.

Скорость звука в воде можно определить измерением с помощью приборов или путем вычислений. Некоторые методы и измерительная аппаратура для непосредственного определения скорости звука в воде описаны в [29]. График зависимости скорости звука от температуры и солености приведен на рис. 2.1.

**Коэффициент пространственного затухания.** Давление в акустической волне уменьшается в связи с расширением ее фронта при удалении от источника, поглощением и рассеянием энергии. Коэффициент пространственного затухания  $\beta$ , дБ/км, может быть определен по номограмме, приведенной на рис. 1.12. Номограмма получена при постоянных значениях  $T = 3^\circ\text{C}$  и  $S = 35\text{‰}$  [29].

Для диапазона частот  $f$  от 16 до 60 кГц возможно применение формулы:  $\beta = 0,036 f^{3/2}$ , дБ/км. Потери энергии, связанные с расширением фронта расходящейся волны, поглощением и рассеянием, при лоцировании пропорциональны  $r^4 \cdot 10^{0,2\beta r}$ , а в режиме передачи (например, при работе на связь) —  $r^2 \cdot 10^{0,1\beta r}$ . Величина  $10^{0,2\beta r}$  для различных  $r$  и  $f$  приведены в табл. 1.10.

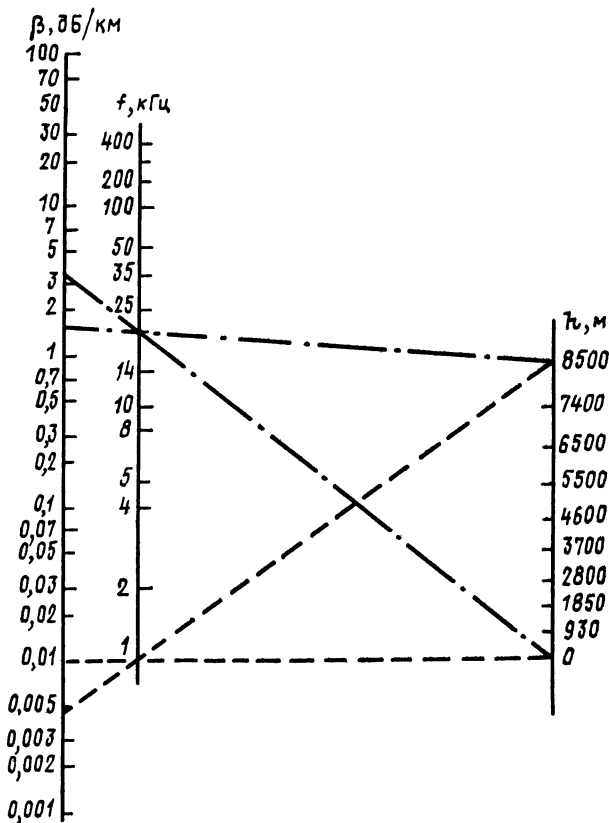


Рис. 1.12. Номограмма для определения коэффициента поглощения звука в морской воде

### 1.2.7. Шумы и помехи

Регистрация эхосигналов от объектов пеленгования на индикаторах всегда осуществляется на фоне суммарной помехи, составляющими которой по своему происхождению являются следующие: природные, технические и реверберационные. Причинами этих помех служат воспринимаемые приемно-усилительным трактом шумы, классификация которых по видам и источникам их возникновения приведена на рис. 1.13. Ниже приводятся характерные признаки некоторых видов шумов и возможные пути снижения их уровня [37, 46].

**Природные помехи.** *Атмосферные* — возникают от воздействия на границу раздела воздух — вода или воздух — лед — вода солнечной радиации, потоков тепла, ветра, осадков, электрических разрядов (молний), изменений атмосферного давления и др.; *донные* — обусловлены землетрясениями, перекачиванием гальки и песка, ударами волн, обтеканием неровностей; *водные* — образуются

Таблица 1.10. Коэффициент заглушения

В, дБ/км	f, кГц	r, км											
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0
2,30	16	1,11	1,37	1,70	2,10	2,89	4,91	8,35	24	69,2	200	575	4790
2,75	18	1,13	1,46	1,88	2,43	3,55	6,68	12,58	44	166	563	2000	
3,22	20	1,16	1,56	2,10	2,82	4,41	9,25	19,41	85	377	1 660		
3,71	22	1,19	1,67	2,35	3,31	5,53	13,01	30,61	170	929	51 300		
4,23	24	1,22	1,79	2,65	3,90	7,02	18,61	49,33	350	2 420			
4,77	26	1,25	1,93	3,00	4,65	9,01	27,03	81,11	730	6 550			
5,33	28	1,28	2,08	3,41	5,56	11,66	39,82	136	1 600	18 400			
5,92	30	1,31	2,26	3,90	6,72	15,24	59,51	232	3 500				
6,52	32	1,35	2,46	4,48	8,10	20,11	90,20	404	8 100				
7,14	34	1,39	2,68	5,17	10,0	26,76	138	716	19 100				
7,78	36	1,43	2,91	5,99	12,3	35,91	215	1290					
8,43	38	1,47	3,14	6,97	15,0	48,60	339	2360					
9,11	40	1,52	3,52	8,14	18,7	66,30	540	4395					
9,80	42	1,57	3,86	9,55	23,5	91,15	870						
10,51	44	1,62	4,26	11,24	29,8	126	1420						
11,23	46	1,68	4,70	13,28	37,0	176	2340						
11,97	48	1,74	5,20	15,75	47,0	248							
12,73	50	1,80	5,80	18,50	60,0	350							
16,73	60	2,32	10,02	47,00	217,0	2200							

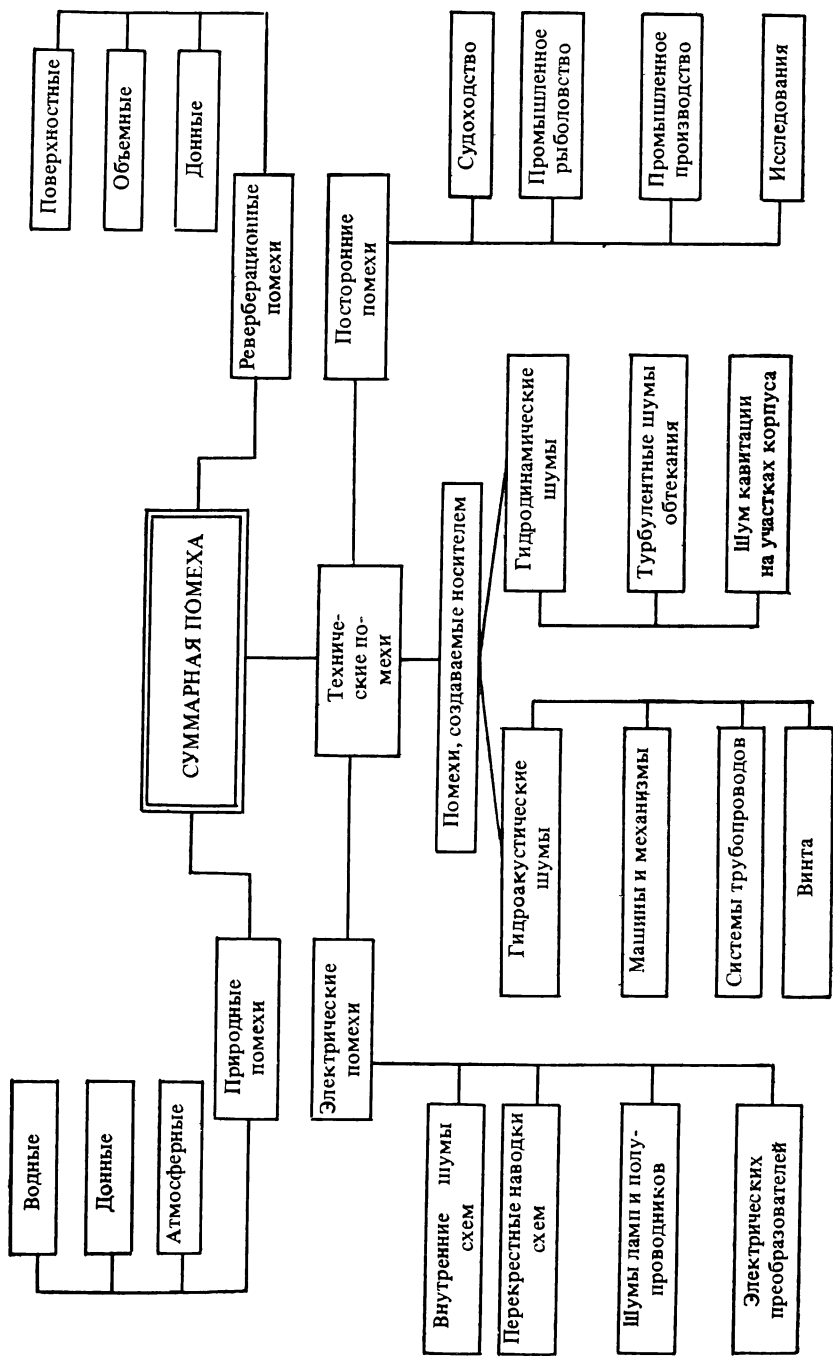


Рис. 1.13. Классификация помех по характеру их возникновения

в результате течения, биоакустической активности подводного мира (рыбы, ракообразные, моллюски, зоопланктон), кавитации воды, турбулентностей потоков. Следует заметить, что уровень биоакустических шумов ниже суммарного уровня помех, наблюдаемых на судах ФРП. Поэтому попытки создания шумопеленгаторных станций промышленного применения для определения объектов промысла по издаваемым ими звукам до настоящего времени не дали положительных результатов.

**Технические помехи.** *Электрические помехи* возникают при работе различных источников и потребителей тока. Шумы тепловые, электронные присущи резисторам, электронным лампам, полупроводниковым приборам.

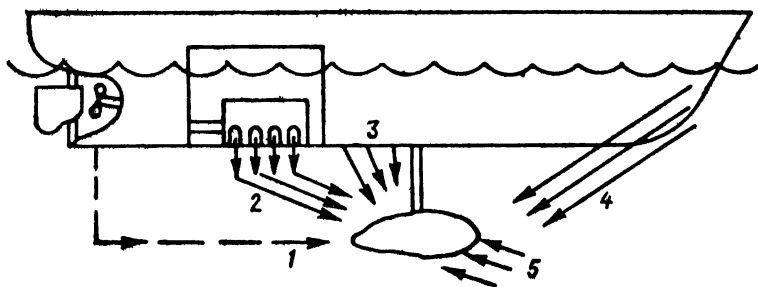


Рис. 1.14. Пути распространения судовых помех

Шум обусловлен влиянием внешних электрических и магнитных полей, в том числе модуляционный, возникающий из-за недостаточной фильтрации тока от источников питания. Шумы \* могут появляться при наличии плохих контактов в схемах. Электрические наводки возникают в момент излучения аппаратурой ультразвукового импульса. На индикаторах электрические помехи (кроме наводки, сопутствующей звуковому импульсу и имеющей относительно постоянный характер) могут появляться в виде отдельных нестабильных во времени различных по интенсивности и форме отметок линий.

На практике определение источника электрических помех производится путем последовательного отключения электрических устройств, которые могут быть причиной их возникновения.

*Помехи, создаваемые носителем.* Механизмы и системы судна являются основными источниками акустических помех работе гидроакустической аппаратуры. Помехи от судовых механизмов возникают в результате распространения акустической энергии по воде и в виде вибраций по конструкциям. Вибрации, сопровождающие работу механизмов, передаются через фундаменты, на которых они установлены, на корпус судна. Наиболее интенсивные виб-

\* Под термином шум судна или отдельного источника понимается уровень звукового давления (общий или в узкой полосе), воздействующий на измерительный прибор (гидрофон).



рации корпуса наблюдаются непосредственно в районе расположения механизма. Обшивка корпуса в этом районе излучает акустическую энергию в воду и создаваемый таким образом шум, распространяясь вдоль корпуса судна, достигает района размещения приемной антенны. Обычно помехи, возникающие вследствие указанного распространения, называют шумовой составляющей от механизмов. Акустические помехи могут появиться также в результате распространения вибраций от механизма по корпусу в район размещения антенны. Помехи, образующиеся в результате распространения акустической энергии в виде вибраций называются вибрационными. Основными источниками вибрации на судах могут быть: дизели, паротурбинные и газотурбинные установки, насосы, компрессоры, трубопроводы, вентиляторы, электрические машины. Причины, вызывающие вибрацию этих механизмов, можно объединить в пять групп; вращение несбалансированных частей механизмов, например валов или якорей электродвигателей; наличие различных толчков и соударений, возникающих, например, при зацеплении зубчатых колес, при вращении якорей и электродвигателей, лопаток турбин; возвратно-поступательное движение отдельных частей механизмов типа поршневых машин при взрывах рабочей смеси в цилиндрах; кавитация и турбулентность потока жидкости в помпах, трубопроводах, клапанах и конденсаторных установках; механическое трение в подшипниках и цапфах.

Снижение шумов от механизмов, а следовательно, и создаваемых ими уровней акустических помех работе гидроакустической аппаратуры является комплексной задачей, которая включает в себя как снижение вибрации самих источников, так и применение различных средств виброизоляции и вибропоглощения. Кроме того, необходима рациональная компоновка механизмов и аппаратуры. Шумовая составляющая помех от работы механизмов при удалении от них антенн уменьшается прямо пропорционально расстоянию  $R$  от механизма до антенны. Вибрационная помеха убывает прямо пропорционально  $\sqrt{R}$ . Основным условием правильной установки антенн и механизмов является разнесение их друг от друга на возможно максимальное расстояние.

**Помехи от винта.** Гребной винт — наиболее мощный источник шума. Возникающие при определенной частоте вращения гребного винта кавитационные явления на его лопастях сопровождаются интенсивным шумоизлучением. Кавитационный шум создается в результате слияния множества звуковых импульсов, образующихся при захлопывании кавитационных пузырьков. Шум винта обладает непрерывным спектром от низких звуковых частот до ультразвуковых. Среднеквадратичное значение кавитационного шума винта возрастает с увеличением скорости носителя пропорционально третьей-четвертой степени. Уровень кавитационного шума (Па) может быть определен по эмпирической формуле

$$P_s = 2 \cdot 10^{-2} [(D^2 v z N)^{1/2} / R'] (\sqrt{\Delta f} / f),$$

где  $D$  — диаметр гребного винта, м;  $v$  — скорость судна, уз;  $z$  — ко-

личество лопастей гребного винта;  $N$  — количество гребных винтов;  $R'$  — расстояние от центра гребного винта до антенны, м.

Для уменьшения помех от шума, издаваемого в воде гребным винтом, весьма успешно применяют средства экранирования резиной кормовой части обтекателя антенны либо осуществляют отстройку антенны от мешающих шумов с помощью формирования в их ХН зоны с пониженной чувствительностью в направлении на мешающий источник шума.

**Помехи от носового буруна.** Наиболее интенсивный шум носовой буруна создает на частотах существенно ниже 10 кГц. Поэтому шум буруна как источник помех на промысловых судах, оборудованных высокочастотной аппаратурой, практического значения не имеет.

**Гидродинамические шумы.** Значительные по интенсивности шумы создаются при обтекании потоком воды корпуса судна. Одна из причин появления этих шумов — пульсации давления в турбулентном пограничном слое, образующемся на поверхности корпуса судна, обтекателе антенны или на самой антенне при отсутствии обтекателя. Пульсации давления, действующие на обшивку корпуса судна или обтекатели антенн, возбуждают в них вибрации, приводящие к излучению обшивкой акустической энергии. При определенных условиях на поверхности обтекателя или близлежащих корпусных конструкциях могут возникнуть кавитационные явления. Кавитация возникает на плохо обтекаемых телах вследствие локальных понижений гидродинамического давления. Наиболее интенсивное шумообразование наблюдается при обтекании тел с острыми кромками, а также при отрывном обтекании сферы и круглого цилиндра. Одним из способов уменьшения помех, вызываемых гидродинамическим обтеканием, является воздействие на поток, приводящее к изменению структуры турбулентности.

**Реверберационные помехи.** В гидроакустике для упрощения процесса анализа реверберационные помехи принято разделять на объемные, поверхностные и донные. Под *объемной реверберацией* подразумевается реверберация\*, обусловленная рассеянием звука малыми частицами, находящимися в глубинных слоях воды, — газовыми пузырьками, твердыми взвешенными частицами, термическими неоднородностями и т. д. Следует заметить, что объемная реверберационная помеха может оказывать и положительное влияние при поиске пелагических рыбных скоплений. Этот эффект объявляется увеличением количества полезной информации от косяка рыбы при отражении звука от отдельных особей, составляющих косяк.

*Поверхностная реверберация* называется рассеянием звука приповерхностным слоем воды и волнистой поверхностью моря.

*Донная реверберация* вызывается рассеянием звука дном моря. Чем больше неровности дна и его отражательная способность, тем

---

\* Морская реверберация — процесс, описывающий изменение во времени суммарного рассеянного звукового поля, наблюдаемого в точке приема после излучения зондирующего импульса.

выше уровень помехи при одинаковых параметрах зондирующего импульса. По индикаторам аппаратуры объемная и поверхностная реверберации проявляются в виде почернения бумаги самописца на начальном (после послышки) участке движения пера, утолщения развертки на электронно-лучевой трубке электронного индикатора, постепенно затухающего звучания на слуховом индикаторе. Явление реверберации усиливается во время шторма и после него. То же наблюдается и в местах скопления водорослей, микроорганизмов, а также там, где имеются температурные и другие неоднородности воды. Реверберация может быть настолько значительной, что заметить полезный эхосигнал на ее фоне становится невозможно. Эта зона называется мертвой. Влияние донной реверберации особенно сказывается при работе аппаратуры в мелком море. В режиме эхолотирования серьезных трудностей для поиска рыбы донная реверберация не создает, так как чаще всего она проявляется после приема первых эхосигналов от поверхности дна, а значит после того, как рыба зафиксирована. В большей степени донная реверберация мешает поиску рыбы при помощи гидролокатора (см. § 1.2.5).

Давление помех ( $P_a$ ), создаваемое реверберацией, можно рассчитать для поверхностной реверберации

$$P_{p. п} = \sqrt{\frac{(\alpha_p h) W_a (ct) (\rho c) \eta \cdot 10^{-0.2\beta r}}{16\pi r^3}};$$

донной

$$P_{p. д} = \sqrt{\frac{\alpha_d H W_a (ct) (\rho c) \eta \cdot 10^{-0.2\beta r}}{16\pi r^4}};$$

объемной

$$P_{p. о} = \sqrt{\frac{\alpha_n W_a (ct) (\rho c) \eta \cdot 10^{-0.2\beta r}}{8\pi r^2}},$$

где  $W_a$  — акустическая мощность, Вт;  $(ct)$  — протяженность зондирующего импульса, м;  $(\rho c)$  — акустическое сопротивление воды, кг/м<sup>2</sup>с (1,5 · 10<sup>6</sup>);  $\eta$  — коэффициент, учитывающий направленные свойства излучателя и приемника. Для ненаправленного излучателя и приемника  $\eta = 1$ , величина безразмерная;  $\beta$  — коэффициент пространственного затухания, дБ/км;  $r$  — расстояние от излучателя до плоскости рассеяния звука, м (в значении  $10^{-0.2\beta r}$  величина  $r$ , км);  $H$  — расстояние от излучателя до дна, м;  $\alpha_d$  — безразмерный коэффициент, характеризующий рассеяние звука дном в сторону источника звука ( $10^{-2}$ — $10^{-3}$ );  $\alpha_n$  — коэффициент, характеризующий рассеивающую способность моря — число рассеивателей, в частности, число пузырьков в единице объема воды. По экспериментальным данным  $\alpha_n = 10^{-5}$ — $10^{-9}$ , 1/см;  $(\alpha_p h) = 10^{-3}$ — $10^{-6}$ .

Определение суммарного уровня помех обычно производится при разных скоростях судна и волнении моря до 3 баллов. При вращающихся ХН дополнительно производится ее определение при различных углах ориентации.

Суммарный уровень помех (Па) рассчитывается по формуле

$$P_{\Sigma} = (U/K_{\Sigma}\gamma) \cdot 10^6, \quad (1.2)$$

где  $U$  — измеренное напряжение на выходе приемно-усилительного тракта станции, В;  $K_{\Sigma}$  — коэффициент усиления приемно-усилительного тракта, при котором производилось измерение;  $\gamma$  — чувствительность антенны, мкВ·м<sup>2</sup>/Н.

С целью определения допустимой величины помех, при которых аппаратура должна обеспечивать необходимую расчетную дальность

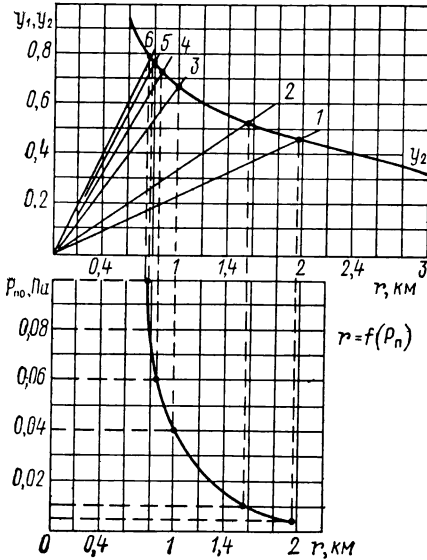


Рис. 1.15. К решению уравнения:

$$y_1 = B/\sqrt{P_{\Sigma,0}}; \quad y_2 = 10^{-0,05\beta r}$$

- 1— $P_{\Sigma,0}=0,005$  Па; 2— $P_{\Sigma,0}=0,01$  Па;  
3— $P_{\Sigma,0}=0,04$  Па; 4— $P_{\Sigma,0}=0,06$  Па;  
5— $P_{\Sigma,0}=0,08$  Па; 6— $P_{\Sigma,0}=0,1$  Па

Дальность действия гидролокатора соответственно будет равна

- $P_{\Sigma,0} = 0,005$  Па;  $r = 2000$  м;  
 $P_{\Sigma,0} = 0,01$  Па;  $r = 1550$ ;  
 $P_{\Sigma,0} = 0,04$  Па;  $r = 1000$  м;  
 $P_{\Sigma,0} = 0,06$  Па;  $r = 820$  м;  
 $P_{\Sigma,0} = 0,08$  Па;  $r = 790$  м;  
 $P_{\Sigma,0} = 0,1$  Па;  $r = 780$  м.

действия, измеренный уровень приводят к стандартным условиям — к частоте 1 кГц, полосе частот 1 Гц и ненаправленному приему ( $K = 1$ ). Пересчет измеренного уровня помех  $P_{\Sigma}$  к стандартному  $P_{\Sigma,0}$  производится по формуле

$$P_{\Sigma,0} = P_{\Sigma} (f_0/f_{ст}) \sqrt{K\Delta f_{ст}/K_{ст}\Delta f_0} = P_{\Sigma} (f_0 \sqrt{K} / \sqrt{\Delta f}), \quad (1.3)$$

так как  $f_{ст} = 1$  кГц;  $\Delta f_{ст} = 1$  Гц;  $K = 1$ .

Дальность действия в зависимости от изменения уровня помех, принятого в расчетах при проектировании, может быть определена из уравнения

$$r = (B/\sqrt{P_{\Sigma,0}}) \cdot 10^{-0,05\beta r}; \quad (1.4)$$

$$B = \sqrt{W_a K R_s^2 (\rho c)_B / 16\pi d^2}.$$

В формулах (1.3) и (1.4):  $f$  — рабочая частота, кГц;  $K$  — коэффициент концентрации;  $\Delta f$  — суммарная полоса частот пропускания антенны и усилителя, Гц;  $\beta$  — коэффициент пространственного затухания, дБ/км;  $W_a$  — акустическая мощность, Вт;  $R_s$  — радиус

эквивалентной сферы,  $m$ ;  $(\rho c)$  — акустическое сопротивление воды ( $1,5 \cdot 10^6$  кг/м $\cdot$ с $^2$ );  $\delta$  — коэффициент распознавания.

**Пример.** При значениях параметров гидролокатора:  $f_r = 19,7$  кГц;  $W_a = 550$  Вт;  $K = 70$ ;  $\delta = 0,8$ ;  $R_3 = 2$  м;  $P_{п.о} = 0,04$  Па — дальность обнаружения объекта пеленгования  $r = 1000$  м. Определить дальность действия локатора при уровне суммарной помехи, отличной от принятой (т. е.  $P_{п.о} \neq 0,04$  Па).  
Р е ш е н и е.

$$r = \sqrt[4]{\frac{W_a K R_3^2 (\rho c)}{16\pi P_{п.о}^2 \delta^2}} 10^{0,28r} = (B/\sqrt{P_{п.о}}) \cdot 10^{-0,05\beta r},$$

где  $B = \sqrt[4]{\frac{W_a K R_3^2 (\rho c)}{16\pi \delta^2}} = \sqrt[4]{\frac{550 \cdot 70 \cdot 2^2 \cdot 1,5 \cdot 10^6}{16\pi \cdot 0,8^2}} = 290.$

Дальность действия гидролокатора в зависимости от  $P_{п.о}$  определяется из графика, приведенного на рис. 1.15, построенного по результатам графического решения трансцендентного уравнения.

### 1.2.8. Коэффициент распознавания

Коэффициент распознавания — минимально необходимое отношение напряжений сигнала и помехи на входе приемно-усилительного тракта, при котором обеспечивается обнаружение объекта пеленгования с заданной вероятностью. Порог обнаружения сигнала на фоне помех меняется с изменением вероятностей правильного обнаружения  $P_{п.о}$  и ложной тревоги  $P_{л.т}$  ( $P_{п.о}$  — вероятность, при которой в случае присутствия сигнала принято правильное решение — «Сигнал есть»;  $P_{л.т}$  — вероятность того, что в случае отсутствия сигнала принимается неверное решение — «Сигнал есть»).

Длительности сигналов поисковой аппаратуры малы, и при расчетах  $P_{л.т}$  промежутки времени принимают длительностью 5—10 мин.

Для решения задач подводного наблюдения характерны следующие условия построения и работы гидролокационной аппаратуры: приемный тракт состоит из высокочастотного фильтра, линейного детектора, интегратора, сигнал имеет синусоидальное заполнение, прием простых эхосигналов осуществляется на фоне помех с амплитудой, флюктуирующей по релеевскому закону. При этих условиях вероятность правильного обнаружения эхосигнала от одного зондирующего импульса может быть определена из выражения [34]

$$P_{п.о} = \exp(\ln P_{л.т}/1 + \delta), \quad (1.5)$$

где  $\delta$  — коэффициент распознавания, от  $N$  зондирующих импульсов

$$P'_{п.о} = 1 - \sqrt[N]{1 - P_{п.о}}. \quad (1.6)$$

Решая (1.5) относительно  $\delta$ , получим по мощности

$$\delta = \ln P_{л.т}/\ln P_{п.о} - 1 = \lg P_{л.т}/\lg P_{п.о} - 1 \quad (1.7)$$

или

$$\delta = 10 \lg(\lg P_{л.т}/\lg P_{п.о} - 1), \text{ дБ};$$

по интенсивности

$$\delta = \sqrt{\lg P_{л.т} / \lg P_{п.о} - 1} \quad (1.8)$$

или

$$\delta = 20 \lg (\lg P_{л.т} / \lg P_{п.о} - 1), \text{ дБ.}$$

При расчетах гидролокационной аппаратуры значения  $P_{п.о}$  и  $P_{л.т}$  обычно задаются. В табл. 1.11 приведены рассчитанные по формулам (1.6) и (1.8) значения коэффициента распознавания  $\delta$  (по интенсивности) для различных значений  $P_{п.о}$ ,  $P_{л.т}$  и  $N$ .

Таблица 1.11. Коэффициент распознавания  $\delta$  (по интенсивности) в зависимости от вероятности ложной тревоги  $P_{л.т}$  правильного обнаружения  $P_{п.о}$  и количества зондирующих импульсов  $N$

$P_{п.о}$	$N$	$P'_{п.о}$	$P_{л.т}$					
			$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
0,8	1	0,80	8,44	7,80	7,11	6,34	5,47	4,43
	2	0,55	5,09	4,70	4,27	3,79	3,25	2,58
	4	0,33	3,69	3,39	3,07	2,71	2,29	1,77
	8	0,19	2,95	2,71	2,44	2,13	1,78	1,33
0,7	1	0,70	6,75	6,25	5,69	5,07	4,34	3,51
	2	0,45	4,36	4,02	3,64	3,23	2,75	2,11
	4	0,26	3,30	3,03	2,73	2,40	2,02	1,35
	8	0,14	2,69	2,46	2,21	1,93	1,59	1,16
0,6	1	0,60	5,55	5,13	4,66	4,16	3,55	2,84
	2	0,37	3,91	3,60	3,26	2,88	1,15	1,91
	4	0,20	3,00	2,75	2,47	2,17	1,51	1,36
	8	0,11	2,51	2,29	2,05	1,17	1,45	1,04
0,5	1	0,50	4,73	4,36	3,96	3,51	3,00	2,38
	2	0,30	3,53	3,25	2,94	2,59	2,18	1,69
	4	0,16	2,78	2,55	2,29	2,00	1,66	1,22
	8	0,08	2,44	2,11	1,88	1,62	1,31	0,90
0,4	1	0,40	4,06	3,74	3,54	3,00	2,55	2,00
	2	0,23	3,15	2,89	2,61	2,29	1,92	1,45
	4	0,12	2,57	2,34	2,11	1,83	1,50	1,08
	8	0,06	2,17	1,98	1,76	1,51	1,21	0,79
0,3	1	0,30	3,53	3,25	2,94	2,59	2,18	1,69
	2	0,16	2,78	2,55	2,29	2,00	1,66	1,22
	4	0,09	2,38	2,16	1,94	1,68	1,36	0,95
	8	0,04	2,00	1,81	1,60	1,36	1,07	0,65

Вероятность  $P_{л.т}$  определяется из выражения

$$P_{л.т} = 2Ln/ctm, \quad (1.9)$$

где  $L$  — дальность действия аппаратуры, м;  $n$  — принимаемое количество ложных тревог, ед. за время  $t$ , с;  $c$  — скорость звука, м/с;

$m = m_r m_\alpha m_\beta m_f$  — количество альтернатив (элементов разрешения);  $m_r = L/\Delta r = 2L/c\tau$  — число элементов разрешения по дистанции, равное отношению дальности действия аппаратуры  $L$  к разрешающей способности по дистанции  $\Delta r = c\tau/2$  (длительность импульса  $\tau$ , с;  $c$  — скорость звука, м/с);  $m_\alpha = \alpha/\Delta\theta_a$  — число пространственных каналов, равное отношению сектора сканирования в азимутальной плоскости  $\alpha$  к разрешающей способности по азимуту (ширине ХН в азимутальной плоскости  $\Delta\theta_a$ );  $m_\beta = \beta/\Delta\theta_m$  — число пространственных каналов, равное отношению сектора сканирования в угломестной плоскости  $\beta$  к разрешающей способности по углу места (ширине ХН в угломестной плоскости  $\Delta\theta_m$ );  $m_f = \Delta F/\Delta f$  — число частотных каналов, равное отношению общей полосы частот  $\Delta F$  приемного тракта к полосе одного фильтра  $\Delta f$ .

Подставляя значения  $m$  в (1.9) имеем

$$P_{л.т} = (n\tau\Delta\theta_a\Delta\theta_m\Delta f)/(t\alpha\beta\Delta F). \quad (1.10)$$

На практике для одноканальных локационных станций используется приближенная формула

$$\delta = \sqrt{2} K_\delta / \sqrt{\Delta f T}, \quad (1.11)$$

где  $K_\delta$  — коэффициент надежности приема. Минимально допустимое отношение сигнал/помеха на входе индикатора;  $\Delta f$  — полоса пропускания приемного тракта, Гц;  $T$  — время усреднения сигнала, принимаемое равным минимальной длительности зондирующего импульса  $\tau$ , с.

**Пример.** Для вычисления энергетических параметров сканирующего гидролокатора определить коэффициент распознавания  $\delta$  при вероятности правильного обнаружения  $P_{п.о.}$  равной 0,8, и числе ложных тревог  $P_{л.т}$  не более одной  $n = 1$  в течение  $t = 10$  мин.

Гидролокатор имеет следующие тактико-технические параметры: углы ХН в азимутальной и угломестной плоскостях —  $4^\circ$  (т. е.  $\Delta\theta_a = \Delta\theta_m = 4^\circ$ ) сканирование ХН осуществляется в секторе  $90^\circ$  только в азимутальной плоскости (т. е.  $\beta/\Delta\theta_m = 1$ ); длительность зондирующих импульсов —  $5 \cdot 10^{-3}$ , с; число частотных каналов равно 1 (т. е.  $\Delta F/\Delta f_i = 1$ ); зондирование производится по одной посылке (т. е.  $N = 1$ ).

Решение. Вероятность ложной тревоги  $P_{л.т}$  определяем из выражения (1.10):  $P_{л.т} = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 4 / 10 \cdot 60 \cdot 90 = 0,37 \cdot 10^{-6}$ .

Коэффициент распознавания  $\delta$  (по интенсивности) определяем по формуле (1.8):  $\delta = \sqrt{(\lg 0,37 \cdot 10^{-6}) / \lg 0,8} \approx 7$ .

### 1.2.9. Акустическая мощность

Акустическая мощность — один из основных параметров, характеризующий гидролокационную аппаратуру, определяется выражениями\*:

$$W_a = [(\delta^2 P_{п.о.}^2 \cdot 16\pi r^4 \cdot 10^{12}) / R_s^2 K(\rho c)_в] \cdot 10^{0,2\beta r};$$

$$W_a = \eta_{за} W_s; \quad W_a = 4\pi P^2 / (\rho c)_в K; \quad (1.12)$$

\* Не учитываются потери энергии в обтекателе, полосовых фильтрах, приемном тракте, коммутаторах, антенне. Обычно суммарный уровень этих потерь принимают равным 3 дБ.

где  $\delta$  — коэффициент распознавания;  $P_{п.о}$  — суммарная акустическая помеха, приведенная к стандартным условиям, Па;  $r$  — дальность действия аппаратуры, м (в сомножителе  $10^{0,2\beta r}$  величина  $r$  измеряется в километрах);  $R_э$  — радиус эквивалентной сферы (сила цели), м;  $K$  — коэффициент концентрации антенны;  $P = L_r U \cdot 10^9 \gamma K_y$ , Па, м — давление, приведенное к 1 м;  $c$  — скорость звука в воде, м/с;  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho c$  — акустическое (волновое) сопротивление среды, кг/м<sup>2</sup>·с;  $\beta$  — коэффициент пространственного затухания, дБ/км;  $\eta_{эа}$  — электроакустический коэффициент полезного действия антенны;  $L_r \geq D^2/\lambda$  — расстояние между гидрофоном и излучающей поверхностью антенны, м;  $D$  — наибольший ее размер, м;  $\lambda$  — длина волны, м;  $\gamma$  — чувствительность гидрофона, мкВ/Па;  $W_э$  — электрическая мощность, Вт;  $K_y$  — коэффициент передачи приемного тракта;  $U$  — напряжение, развиваемое измерительным гидрофоном на выходе измерительного тракта, В.

Определения параметров, входящих в формулы, приведены в соответствующих разделах настоящей главы и в гл. 2, 3. Для расчета некоторых из этих параметров необходимо знать или обосновать следующие параметры: рабочую (резонансную) частоту, полосу пропускания приемно-усилительного тракта, длительность зондирующего импульса и ширину ХН антенны.

**Рабочая частота.** В гидролокации существует оптимальная частота, на которой обеспечивается максимальная дальность действия аппаратуры при наименьшей излучаемой мощности. Оптимальную частоту можно определить из формулы

$$f = 39/r^{2/3}, \text{ кГц.} \quad (1.13)$$

Рассчитанные по формуле (1.13) значения оптимальных частот в зависимости от дальности действия приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12. Оптимальная частота для заданной дальности действия локатора

$r$ , км	$f$ , кГц	$r$ , км	$f$ , кГц	$r$ , км	$f$ , кГц	$r$ , км	$f$ , кГц
0,05	287,4	1,2	34,5	3,5	16,9	8,0	9,8
0,1	181,0	1,4	31,2	4,0	15,5	9,0	9,0
0,2	114,0	1,6	28,5	4,5	14,3	10,0	8,4
0,4	71,8	1,8	26,4	5,0	13,3	15,0	6,4
0,6	54,8	2,0	24,6	5,5	12,5	20,0	5,3
0,8	45,3	2,5	21,2	6,0	11,8	25,0	4,6
1,0	39,0	3,0	18,8	7,0	10,6	30,0	4,0



**Полоса пропускания приемно-усилительного тракта** может быть найдена с помощью выражения

$$\Delta f = 4f_0 [(v_1 + v_2)/c] + 1/\tau + \Delta f_{\text{п}}, \text{ Гц} \quad (1.14)$$

где  $4f_0 [(v_1 + v_2)/c]$  — полоса частот, необходимая для перекрытия эффекта Доплера \*;  $1/\tau$  — полоса частот, необходимая для прохождения импульса длительностью  $\tau$ ;  $\Delta f_{\text{п}} \approx 100$  Гц — полоса, необходимая для компенсации нестабильности частоты передающего тракта;  $f_0$  — рабочая (резонансная) частота, Гц;  $v_1$  — скорость движения пеленгующего судна, м/с;  $v_2$  — скорость движения объекта пеленгования, м/с;  $c$  — скорость звука, м/с;  $\tau$  — длительность зондирующего импульса, с.

**Длительность зондирующего импульса** определяет разрешающую способность аппаратуры и протяженность мертвой зоны по дальности (или глубине). Чем больше длительность зондирующего импульса, тем большее расстояние занимает импульс в пространстве и тем больше должно быть расстояние между пеленгуемыми объектами для их раздельной локации. Длительность импульса влияет на дальность (или глубину) обнаружения. Для повышения разрешающей способности и сокращения протяженности мертвой зоны желателен короткий импульс, а для повышения отношения сигнал/помеха необходимы зондирующие импульсы большой длительности. В связи с этим противоречие в ПА предусматривают короткие и длительные зондирующие импульсы. У рыбопоисковых эхолотов величина зондирующих импульсов обычно лежит в пределах от 0,5 до 5,0 мс, гидролокаторов — от 0,5—1,0 до 20—30 мс. Максимально допустимая длительность импульса ограничивается реверберацией, маскирующей эхо.

В навигационных эхолотах отраженный импульс, поступающий на антенну, растягивается во времени за счет приема сигналов боковыми лепестками. Образуется суперпозиция сигналов, отраженных от различных точек дна, лежащих в пределах зоны облучения зондирующим импульсом. За счет этого амплитуда отраженного импульса нарастает примерно по экспоненциальному закону, начиная от прихода к антенне начала импульса по кратчайшему пути и до некоторого момента (определяемого шириной ХН, длительностью импульса и глубиной места). Этот эффект действует до известного предела. Таким пределом ориентировочно можно считать длительность  $\tau = (2H/c) [1/(\cos \Delta\theta/2) - 1]$ , мс, где  $H$  — измеряемая глубина, м;  $\Delta\theta$  — угол раствора основного лепестка ХН антенны, град;  $c$  — скорость звука, м/с.

В табл. 1.13 приведены значения оптимальной длительности зондирующего импульса, для различных значений  $H$  и  $\Delta\theta$ .

**Ширина характеристики направленности** выбирается в зависимости от назначения станции, дальности действия, точности пеленгования и дестабилизирующих факторов — качки и рыскания судна. У локаторов, предназначенных для поиска объектов промысла на малых

---

\* Эффект Доплера проявляется в изменении частоты приема по сравнению с излучаемой при движении носителя аппаратуры и объекта пеленгования.

глубинах, основным при выборе ширины ХН в угломестной плоскости является обеспечение регистрации эхосигналов от отдельных рыб на

Таблица 1.13. Оптимальная длительность зондирующих импульсов для заданной глубины действия эхолота

Δθ, град	Н, м	τ, мс
7	200	0,533
10	500	2,66
16	6000	80,00

максимальных скоростях поиска. Для уверенного обнаружения отдельных рыб на ленте самописца на фоне импульсных помех достаточно принять три—пять эхосигналов. Если остановиться на трех эхосигналах, ширина ХН в угломестной плоскости  $\Delta\theta_m$  может быть определена из выражения

$$\Delta\theta_m = 2\arctg(3v/2hf_n), \text{ град}, \quad (1.15)$$

где  $v$  — скорость судна, уз;  $h$  — глубина регистрации рыб, м;  $f_n$  — частота следования импульсов посылки, 1/с.

Из выражения (1.15) следует, что с уменьшением глубины нахождения объектов промысла для их обнаружения требуются более широкие ХН антенн или большая частота посылки. Ширина ХН в азимутальной плоскости  $\Delta\theta_a$  определяет величину просматриваемой зоны, существенные ограничения на ширину которой накладывает бортовая качка судна, вызывающая угловые смещения антенны (см. § 1.2.5). В табл. 1.14 приведены данные о расстояниях, проходимых судном в единицу времени в зависимости от его скорости.

Таблица 1.14. Путь судна в единицу времени

Скорость судна, уз	Расстояние, м			Скорость судна, уз	Расстояние, м		
	за час	за минуту	за секунду		за час	за минуту	за секунду
1	1 852	30,87	0,51	11	20 372	339,53	5,66
2	3 704	61,73	1,03	12	22 234	370,56	6,17
3	5 556	92,47	1,54	13	24 076	401,26	6,69
4	7 408	123,43	2,06	14	25 928	432,13	7,20
5	9 260	154,33	2,57	15	27 780	463,00	7,72
6	11 112	185,20	3,09	16	29 632	493,86	8,23
7	12 964	216,05	3,60	17	31 484	524,75	8,75
8	14 816	246,91	4,12	18	33 336	555,60	9,26
9	16 668	277,77	4,63	19	35 188	586,46	9,77
10	18 520	308,63	5,14	20	37 040	617,33	10,29

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

## § 2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН

Гидроакустические антенны предназначены для преобразования электрической энергии в акустическую в режиме излучения и обратного преобразования в режиме приема.

Звуковое поле, создаваемое антенной, характеризуется пространственно-временным распределением потенциала  $\Phi$ . Потенциал поля связан со звуковым давлением  $P$  и колебательной скоростью  $V$  следующими дифференциальными соотношениями:  $P = \rho \partial \Phi / \partial t$ ;  $V = -\partial \Phi / \partial r$ , где  $\rho$  — плотность среды (воды),  $t$  — время,  $r$  — радиус-вектор точки наблюдения. Звуковое давление определяется силой, возникающей при колебательных возмущениях в среде, действующей на единицу площади.

Скорость распространения звуковой волны в воде зависит от температуры, солености и в меньшей степени от гидростатического давления (рис. 2.1). Существует следующая связь между длиной волны  $\lambda$ , скоростью распространения звука  $c$  и частотой колебаний  $f$ :  $\lambda = c/f$ ,  $2\pi f/2\pi/\lambda = \omega/k = c$ , где  $\omega$  — круговая частота, а  $k$  — волновое число.

Звуковая энергия, рассеиваемая антенной в единицу времени, называется акустической мощностью  $W_a$ . Поток энергии через единицу времени есть интенсивность, или сила звука  $I$ .

Волновое акустическое сопротивление  $\rho c$  характеризует способность среды «отбирать» от антенны энергию.

В большинстве случаев от антенны требуется излучение (прием) энергии в определенных направлениях. Направленность антенны обуславливается интерференцией звуковых волн. Закономерность распределения в воде потенциала поля, давления или акустической мощности, создаваемых излучающей гидроакустической антенной в зависимости от направления, называется характеристикой направленности (ХН). Аналогично — в режиме приема ХН определяет зависимость эффективности преобразования акустической энергии в электрическую от направления прихода звуковых волн. Форма характеристики направленности меняется с изменением расстояния от антенны. Она стабилизируется, когда волновой фронт ста-

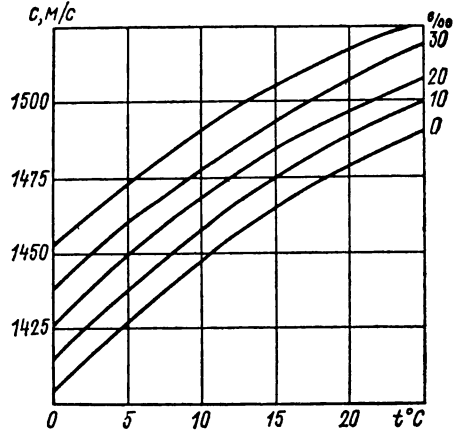


Рис. 2.1. Зависимости скорости звука от температуры и солености воды

новится сферическим, начиная с расстояния  $r = D^2/\lambda$ , где  $D$  — максимальный размер апертуры антенны. Под апертурой понимается проекция излучающей (принимающей) поверхности антенны, перпендикулярная направлению излучения (приема). В общем виде ХН является комплексной функцией направления, задаваемого двумя углами: азимутальным  $\theta_a$  и углом места  $\theta_m$ . Модуль комплексной ХН определяет распределение амплитудных значений потенциала (давления, мощности) и обычно называется амплитудной или просто характеристикой направленности  $R$ . Аргумент называется фазовой характеристикой  $\varphi$  и устанавливает закономерность изменения потенциала скорости вдоль волнового фронта.

## § 2.2. ПЛОСКИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ АНТЕННЫ (ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ПОРШНИ)

Это наиболее широко распространенный вид антенн. Применяется в случаях, когда необходимо сформировать ХН с основным лепестком заданной ширины одинаковой или различной в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: азимутальной (горизонтальной) и угломестной (вертикальной), а жестких требований к углу раствора основного лепестка в других плоскостях, проходящих через главную ось антенны, не предъявляется. Часто используются для получения ножевидных ХН, имеющих резко отличные углы раствора основного лепестка в главных плоскостях, на порядок и более. Нормированная к основному максимуму ХН антенны с размером апертуры больше  $\lambda$  в бесконечном жестком экране в любой плоскости, проходящей через главную ось, определяется выражением

$$R(\theta, \Omega) = \frac{\sin x}{x} \frac{\sin y}{y} = \frac{\sin\left(\frac{\pi D_a}{\lambda} \cos \Omega \sin \theta\right)}{\frac{\pi D_a}{\lambda} \cos \Omega \sin \theta} \times \\ \times \frac{\sin\left(\frac{\pi D_m}{\lambda} \sin \Omega \sin \theta\right)}{\frac{\pi D_m}{\lambda} \sin \Omega \sin \theta},$$

где  $\Omega$  — текущий угол ориентации плоскости, в которой рассчитывается ХН (см. рис. 2.71);  $D_a$  и  $D_m$  — азимутальный и угломестный размеры апертуры. Для азимутальной плоскости  $\Omega = 0$ , и

$$R_a(\theta) = \sin [(\pi D_a/\lambda) \sin \theta] / (\pi D_a/\lambda) \sin \theta,$$

для угломестной  $\Omega = 90^\circ$ , и

$$R_m(\theta) = \sin [(\pi D_m/\lambda) \sin \theta] / (\pi D_m/\lambda) \sin \theta.$$

Зависимости функций синуса и косинуса от угла приведены на рис. 2.2, а функции  $(\sin z)/z$  от аргумента  $(\pi D/\lambda) \sin \theta$  — на рис. 2.3. Последняя представляет форму ХН плоского поршня в главной пло-

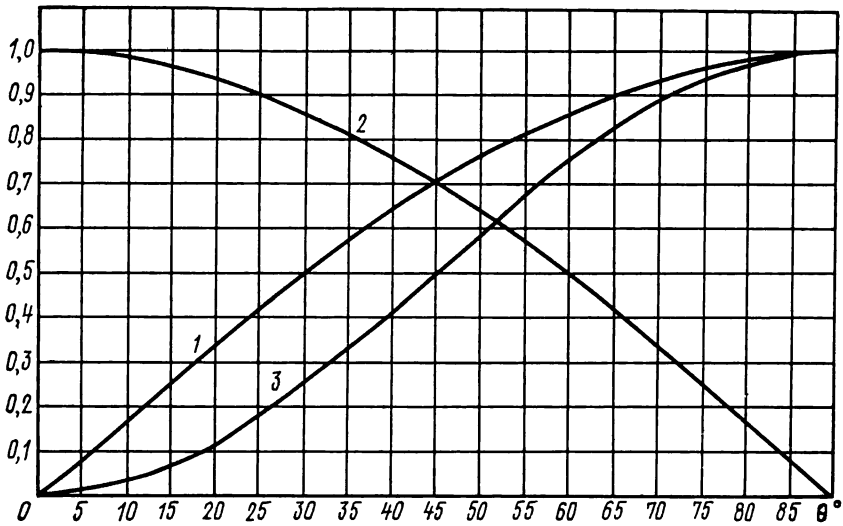


Рис. 2.2. Тригонометрические функции  
1 —  $\sin \theta$ ; 2 —  $\cos \theta$ ; 3 —  $\sin^2 \theta$

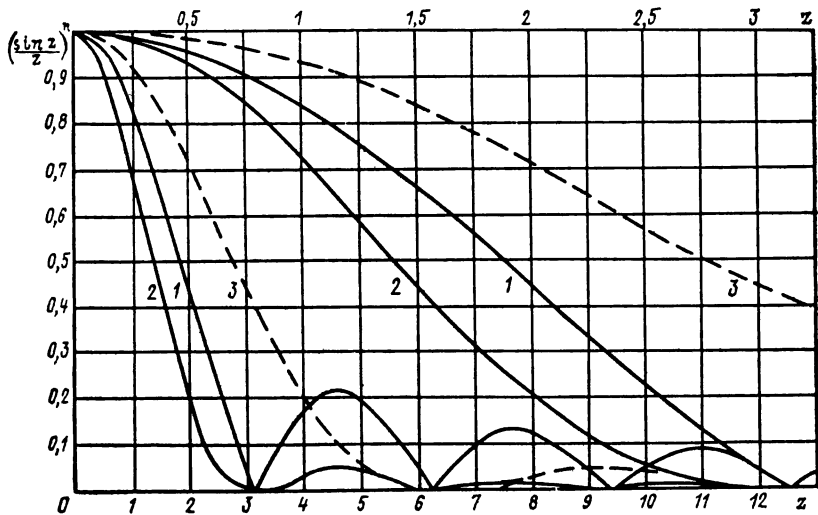


Рис. 2.3. Абсолютные значения функций  $(\sin z/z)^n$

1 —  $\sin z/z$ ; 2 —  $(\sin z/z)^2$ ; 3 — функции, характеризующие изменение направленности при треугольном поршня (функций 1) при введении вдоль стороны поршня треугольного амплитудного распределения. (Правые кривые относятся к значениям  $z$  обозначенным по оси абсцисс сверху.)

скости (параллельной стороне) в общем виде. С помощью приведенных формул и рис. 2.2—2.5 можно определить в секторе  $\pm 90^\circ$  параметры ХН прямоугольной антенны с волновыми размерами, начиная с  $D = 2\lambda$  и более. При меньших размерах поршня с достаточной для инженерных расчетов точностью функция  $(\sin z)/z$  может быть использована для определения ХН только в области основного лепестка на уровнях от 1 до 0,3 ХН антенны размером не менее  $D = \lambda$ . При меньших размерах антенны, работающей без экрана или в экране конечных размеров, при расчете ХН необходимо учитывать дифракцию. Сведения по этому вопросу приводятся ниже.

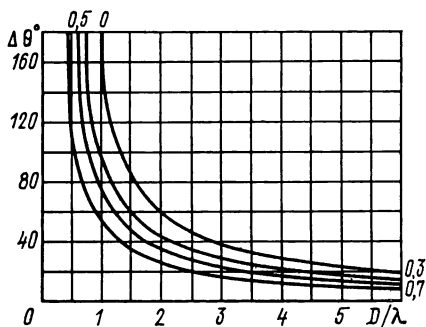


Рис. 2.4. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН прямоугольного поршня в бесконечном жестком экране в плоскости, параллельной стороне, от ее волнового размера на уровнях: 0; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 0,4 до 6

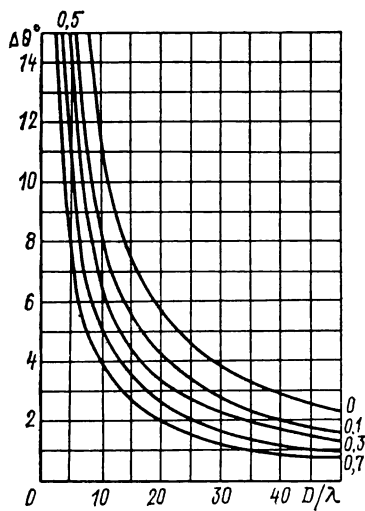


Рис. 2.5. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН прямоугольного поршня в бесконечном жестком экране в плоскости, параллельной стороне, от ее волнового размера на уровнях: 0; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 4 до 50

**Пример.** Определить необходимые размеры апертуры плоской прямоугольной антенны с равномерным амплитудным распределением, формирующей на частоте 30 ГГц ХН с основным лепестком, имеющим углы раствора на уровне 0,7 по давлению в азимутальной плоскости  $\Delta\theta_{0,7a} = 5^\circ$ , в угломерной плоскости  $\Delta\theta_{0,7m} = 15^\circ$ .

1. Находим длину волны  $\lambda = c/f = (1,5 \cdot 10^8)/(3 \cdot 10^{10}) = 0,05$  м.

2. Используем рис. 2.3: по оси абсцисс отложены значения аргумента  $(\pi D/\lambda) \sin \theta$  функции  $\sin z/z = [\sin(\pi D/\lambda \sin \theta)]/(\pi D/\lambda \sin \theta)$ , где  $D$  — полный размер апертуры,  $D_a$  — в азимутальной плоскости,  $D_m$  — в угломерной,  $\theta$  — текущий угол ХН.

3. Находим на оси ординат значение уровня 0,7 и от него параллельно абсциссе проводим линию до пересечения с кривой 1, соответствующей функции  $\sin z/z$ . Определяем на оси абсцисс значение 1,39.

4. Приравняем аргумент  $\pi D/\lambda \sin \theta = 1,39$ . Так как нужно найти  $D$ , преобразуем формулу  $D = 1,39 \lambda/\pi \sin \theta$ .

5. Для азимутальной плоскости  $D_a = 1,39 \cdot 0,05/3,14 \cdot \sin 2,5^\circ = 0,507$  м. Для угломерной плоскости  $D_m = 1,39 \cdot 0,05/3,14 \cdot \sin 7,5^\circ = 0,17$  м.

### § 2.3. ПЛОСКИЕ АНТЕННЫ С ЕСТЕСТВЕННЫМ АМПЛИТУДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

Характеристика направленности прямоугольной антенны с равномерным амплитудным распределением, одинаковыми колебательными скоростями во всех точках апертуры (активной рабочей поверхности антенны) имеет в плоскостях, параллельных сторонам, уровни первых, максимальных, боковых лепестков 22%. Если проектировать источники вдоль апертуры на диагональ квадрата, плотность их распределения по длине оказывается убывающей к краям. Так образуется симметричное линейное (треугольное, ромбовидное) амплитудное распределение. В сечениях, параллельных сторонам, рас-

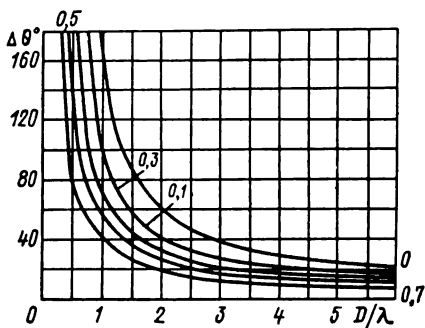


Рис. 2.6. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН квадратного поршня в бесконечном жестком экране в диагональной плоскости от волнового размера стороны на уровнях: 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 0,25 до 6

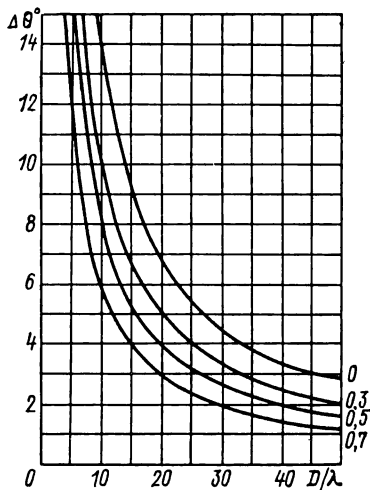


Рис. 2.7. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН квадратного поршня в бесконечном жестком экране в диагональной плоскости от волнового размера стороны на уровнях 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 0,25 до 50

пределение остается равномерным, а в промежуточных между последними и диагональными у любого прямоугольника образуется распределение трапециевидальной формы. Чем больше крутизна (выше порядок) нормированного к максимуму амплитудного распределения, тем существеннее влияет оно на ХН. Спадающее к периферии распределение расширяет основной лепесток и уменьшает боковые; растущее к краям — действует противоположным образом. Во всех случаях происходит уменьшение коэффициента концентрации в сравнении с равновеликой синфазной антенной при равномерном распределении.

Для суждения о формах антенн с амплитудными распределениями обратимся сначала к ХН квадратного (с диагональю  $D_d$ ) поршня в диагональной плоскости. Поскольку в этом случае (см. § 2.2)  $\Omega = 45^\circ$

и  $\sin \Omega = \cos \Omega$ , характеристика направленности определяется формулой

$$R_{\text{д}}(\theta) = \left( \frac{\sin z}{z} \right)^2 = \frac{\sin^2 [(\pi D_{\text{д}}/\lambda) \sin \theta]}{[(\pi D_{\text{д}}/\lambda) \sin \theta]^2}.$$

Функция  $[(\sin z)/z]^2$  показана на рис. 2.3. Экстремумы и нулевые уровни располагаются при тех же значениях аргумента, что и у ХН прямоугольного поршня в плоскости, параллельной стороне. На других уровнях основной лепесток уже (диагональ квадрата в 1,41 раза больше его стороны (рис. 2.6, 2.7).

На практике возможно применение антенн с различными формами апертуры. Ниже рассматриваются формулы, пригодные для расчета нормированных ХН антенн с апертурами трапециевидальной, параллелограммной, ромбической, треугольной и прямоугольной форм.

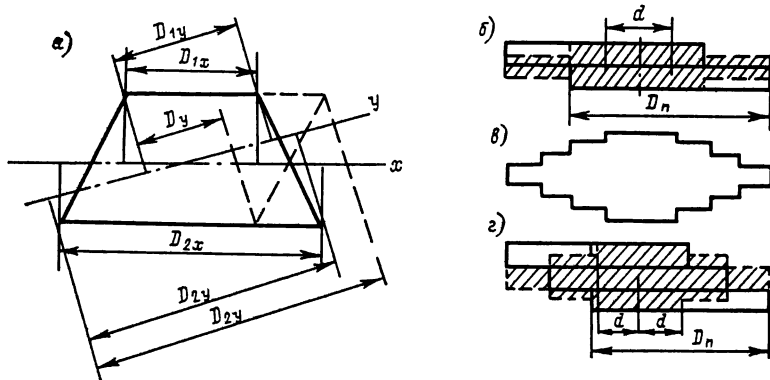


Рис. 2.8. К пояснению расчетных выражений

Общее выражение имеет вид

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 - D_1}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 - D_1}{2} \sin \theta}, \quad (2.1)$$

где  $D_1$  — протяженность проекции апертуры антенны с равномерным амплитудным распределением на линию сечения, в котором рассматривается ХН;  $D_2$  — полный размер проекции апертуры на линию расчетного сечения (рис. 2.8, а). В частных случаях (треугольник или ромб)  $D_1 = 0$ , и выражение (2.1) принимает вид ( $D_2 \rightarrow D$ ):

$$R(\theta) = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D}{2} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D}{2} \sin \theta\right)^2}.$$

У прямоугольных антенн (не ромбических) в главных плоскостях



$D_1 = D_2$ ,  $(D_2 - D_1)/2 = 0$ , и выражение (2.1) приводится к виду

$$R(\theta) = \frac{\sin[(\pi/\lambda) D \sin \theta] \sin 0}{(\pi/\lambda) D \sin \theta \cdot 0}.$$

Неопределенность типа  $0/0$  (или  $\infty/\infty$ ) раскрывается по правилу Лопиталья [7], для чего отдельно берутся производные от функций, стоящих в числителе и знаменателе, и подставляются частные значения. Если снова получается неопределенность, процесс продолжают. Таким образом,  $(\sin x/x \rightarrow (\sin x)'/(x)' = (\cos x)/1 = (\cos 0)/1 = 1$  и  $(\sin 0)/0 = 1$ .

Практически антенны со сложной формой контура апертуры проще выполнять, набирая ее из преобразователей небольших размеров, например прямоугольной формы, в виде мозаики. В этом случае контур антенны и амплитудное распределение приобретают ступенчатый вид. Таким способом можно регулировать амплитудное

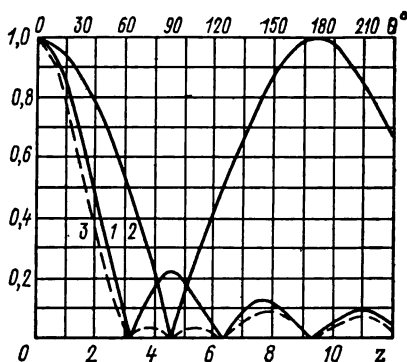


Рис. 2.9. Абсолютные значения функций 1 —  $\sin z/z$ ; 2 —  $\cos(0,35 z)/\cos(0,35 z)$ ; 3 —  $(\sin z/z) \cos(0,35 z)$

распределение и форму ХН. Начнем с антенны, составленной из двух прямоугольных поршней (см. рис. 2.8, б). Необходимо рационально подобрать размер прямоугольного поршня и величину сдвига центров поршней между собой. ХН такой составной антенны на основании теоремы умножения [44] \* определяется выражением

$$R(\theta) = \frac{\sin[(\pi/\lambda) D_n \sin \theta]}{(\pi/\lambda) D_n \sin \theta} \cos[(\pi/\lambda) d \sin \theta], \quad (2.2)$$

т. е. является произведением характеристики направленности прямоугольного поршня с размером  $D_n$  и дипольного вибратора, состоящего из двух точечных источников, разнесенных на расстояние  $d$ .

Первый сомножитель (2.2) обуславливает расположение наибольшего бокового лепестка (ближайшего к основному) при значении аргумента  $(\pi/\lambda) D_n \sin \theta = 4,5$ . В связи с этим целесообразно выбирать  $d$  таким, чтобы минимум, определяемый вторым сомножителем (2.2), располагался в месте нахождения наибольшего бокового максимума. Исходя из этого и условия выполнения равенства  $(\pi/\lambda) d \sin \theta = \lambda/2$ , можно найти, что  $d = 0,35 D_n$ . График функции (2.2), отвечающий поставленным условиям, показан пунктиром на рис. 2.9.

\* Характеристика направленности  $R(\theta)$  группы одинаково направленных вибраторов определяется произведением характеристики направленности отдельного элемента группы на характеристику направленности такой же группы точечных элементов.

Видно, что ближайший боковой лепесток с уровнем 22 % разбился на два с уровнями по 4 %. Антенна такого типа фактически составлена из трех частей. Протяженность средней части, имеющей вдвое большую амплитуду, примерно в два раза больше, чем краев.

Для уменьшения последующих (десятипроцентных) лепестков и снижения их общего уровня (больше, чем на 4 %) процесс дробления продолжают. Можно, например, скомбинировать две антенны только что рассматривавшегося вида, сдвинув их центры на расстояние,  $d = 0,2 D_n$ . Получится база, изображенная на рис. 2, в, у которой протяженности (слева — направо) ступеней относятся как 4 : 3 : 4 : 9 : 4 : 3 : 4, амплитуды соответственно — 1 : 2 : 3 : 4 : 3 : 2 : 1, а ХН описывается выражением

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta} \cos\left(0,35 \frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta\right) \cos\left(0,2 \frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta\right).$$

У этой антенны наибольший боковой лепесток имеет уровень  $\sim 4$  %.

Если продолжить дробление по такому же принципу, то добавляется сомножитель  $\cos [0,143 (\pi/\lambda) D_n \sin \theta]$ , и так далее. Чем больше делается ступеней, тем лучше приближение к непрерывному распределению и ниже боковые лепестки. Следует заметить, что во многих случаях практически бывает вполне достаточно выполнить три — пять ступеней. Может быть удобным применение антенны вида, показанного на рис. 2.8, з, у которой протяженность ступеней относится как 1 : 1 : 2 : 1 : 1, амплитуды — 1 : 2 : 3 : 2 : 1, а ХН определяется формулой

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} D_n \sin \theta} \frac{\sin\left(3 \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)}{3 \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)}. \quad (2.3)$$

Второй сомножитель в (2.3) определяет характеристику направленности дискретной базы из трех точечных элементов. Если поставить условие, чтобы второй сомножитель давал нуль там, где первый определяет максимальный боковой лепесток, необходимо положить  $d = 0,23 D_n$ .

Еще меньший уровень боковых лепестков может быть получен путем комбинирования формы и смещения трапеций или треугольников, что в пределе приводит к параболическому амплитудному распределению. Если принять для трапеции  $D_2 = 6 D_1$  и  $(D_2 - D_1)/(D_2 + D_1) = 0,71$ , то выражение для характеристики направленности примет вид

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta} \frac{\sin\left(0,71 \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta\right)}{0,71 \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin \theta}.$$

Отношение оснований здесь выбрано таким образом, что второй сомножитель равен нулю, когда первый определяет максимальный боковой лепесток. В результате уровни боковых лепестков составляют по порядку примерно 2,5; 1,8; 1,0 %. Условие  $D_2 = 6D_1$  не является строго критичным. При  $D_2 = 5$  или  $D_2 = 7D_1$  уровни боковых лепестков примерно такие же.

Для снижения уровня боковых лепестков до 1 % необходимо выбрать две трапеции с соотношением оснований:  $D_2 = 8,3 D_1$ ;  $(D_2 - D_1)/(D_2 + D_1) = 0,785$ , сдвинутых вдоль оснований на расстояние  $d = 0,308 [(D_1 + D_2)/2]$ . ХН такой фигуры в плоскости, параллельной основаниям, будет

$$R(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin\theta} \times$$

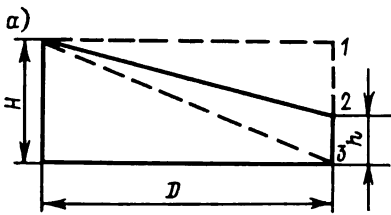
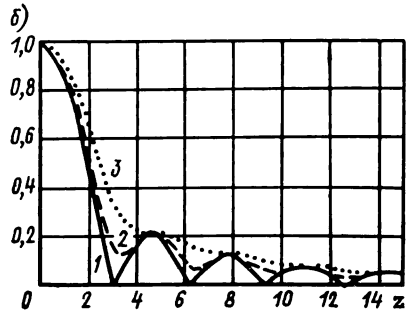


Рис. 2.10. К пояснению влияния асимметрии амплитудного распределения на форму ХН



1 — ХН прямоугольного поршня; 2 — то же трапеции; 3 — то же прямоугольного треугольника (частный случай трапеции при  $h = 0$ )

$$\times \frac{\sin\left(0,785 \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin\theta\right)}{0,785 \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin\theta} \cos\left(0,308 \frac{\pi}{\lambda} \frac{D_2 + D_1}{2} \sin\theta\right).$$

Если составлять антенну из треугольников (или ромбов), постепенно уменьшая смещение, получим в апертуре параболическое амплитудное распределение. Характеристика направленности антенны с таким амплитудным распределением

$$R(\theta) = \sin^3 [(\pi/\lambda) D_2 \sin\theta] / [(\pi/\lambda) D_2 \sin\theta]^3.$$

Суммарная амплитуда поля в направлении максимального значения основного лепестка определяется площадью апертуры.

Иногда встречаются антенны с несимметричным амплитудным распределением (или несимметричной апертурой), например вида, показанного на рис. 2.10, а. ХН в плоскости, перпендикулярной основа-

ниям трапеции, определяется выражением

$$R(\theta) = \frac{H+h}{2} D \sqrt{\frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right)^2} + \left(\frac{H-h}{H+h}\right)^2} \times$$

$$\times \left[ \frac{\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right)^2} - \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} D \sin \theta\right) \right]^2,$$

где  $[(H+h)/2]D$  — множитель амплитуды, принимаемый равным 1 при нормировании. Из рис. 2.10, б видно, что чем больше крутизна асимметричного амплитудного распределения, тем шире основной лепесток и выше межлепестковые уровни ХН [58].

#### § 2.4. ПЛОСКИЕ АНТЕННЫ С КРУГЛОЙ АПЕРТУРОЙ [КРУГЛЫЕ ПОРШНИ]

Это широко распространенный в гидроакустике тип антенны. Применяется в случае необходимости формирования ХН, имеющей круговую симметрию относительно оси, проходящей через центр ан-

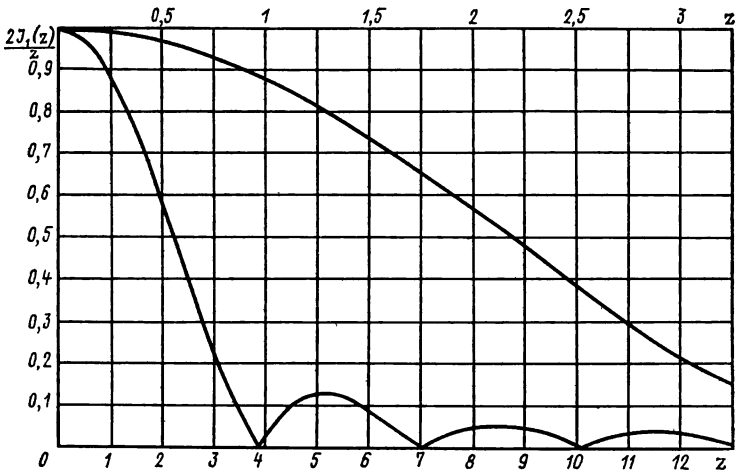


Рис. 2.11. Абсолютные значения функции  $[2J_1(z)]/z$

Правая кривая относится к значениям  $z$ , отложенным по оси абсцисс сверху

тенны перпендикулярно к ее поверхности. Все точки поверхности антенны колеблются синфазно и с одинаковой амплитудой.

Нормированная к максимальному значению характеристика направленности определяется выражением

$$R(\theta) = 2\mathcal{J}_1(z)/z = 2\mathcal{J}_1[(\pi/\lambda)D \sin \theta]/(\pi/\lambda)D \sin \theta,$$

где  $\mathcal{J}_1$  — табулированная цилиндрическая функция Бесселя первого порядка [54]. С помощью рис. 2.11 или вышеприведенного выражения можно определить в секторе  $\pm 90^\circ$  ХН круглого поршня любых размеров, находящегося в бесконечно жестком бесконечно протяженном экране, а также приближенную с достаточной степенью точности для инженерных расчетов, ХН круглого поршня (при диаметре, большем  $2\lambda$ ), работающего без экрана (рис. 2.12, 2.13).

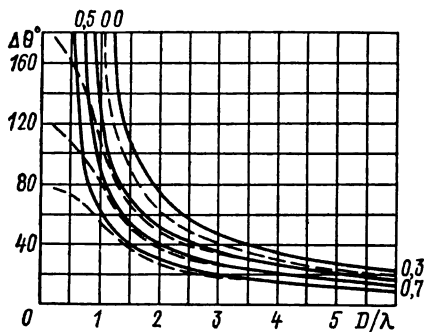


Рис. 2.12. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН круглого поршня от волнового размера диаметра на уровнях: 0; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 0,25 до 6

Сплошные кривые — для поршня в бесконечном жестком экране, штриховые — для одностороннего поршня с жестким экраном только вдоль тыльной поверхности

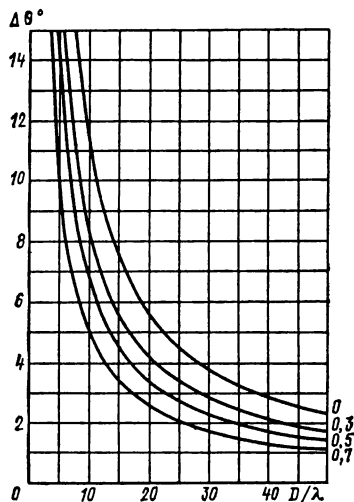


Рис. 2.13. Зависимости углов раствора основного лепестка ХН круглого поршня в бесконечном жестком экране от волнового размера диаметра на уровнях: 0; 0,3; 0,5; 0,7 по давлению при  $D/\lambda$  от 0,3 до 50

**Пример.** Определить ширину основного лепестка характеристики направленности на уровне 0,7 по давлению плоской антенны с равномерным амплитудным распределением и круглой апертурой диаметром 2 м, работающей на частоте 10 кГц.

1. Находим длину волны  $\lambda = c/f = (1,5 \cdot 10^3)/10^4 = 0,15$  м.

2. Обращаемся к рис. 2.11, где изображен график функции  $2\mathcal{J}_1(z)/z = [2\mathcal{J}_1(\pi D/\lambda \sin \theta)]/(\pi D/\lambda \sin \theta)$ .

По оси абсцисс здесь отложены значения аргумента  $\pi D/\lambda \sin \theta$ , где  $D$  — диаметр апертуры, а  $\theta$  — текущий угол характеристики направленности.

3. Определяем значение аргумента, соответствующее уровню 0,7 функции  $2\mathcal{J}_1(z)/z = 0,7$ ;  $(\pi D/\lambda) \sin \theta = 1,6$ .

4. Определяем текущий угол характеристики направленности  $\sin \theta = (1,6\lambda)/\pi D = (1,6 \cdot 0,15)/(2,00 \cdot 3,14 \cdot 16) = 0,0387$ .

5. Находим угол раствора основного лепестка:  $\Delta\theta_{0,7} = 2\theta_{0,7} = 2 \arcsin 0,0387 = 2 \cdot 2,218 = 4,4^\circ$ .

Для повышения оперативности расчетов в процессе выбора антенн в табл. 2.1, 2.2 приведены данные по взаимосвязанным параметрам антенн различных типов.

Табл. 2.1 содержит значения коэффициентов  $\chi$  для определения с помощью формулы  $\Delta\theta_R = \chi\lambda/D$  полной ширины основного лепестка (в градусах) основного лепестка характеристики направленности (на различных уровнях  $R$  по давлению) в зависимости от волнового  $D/\lambda$  размера плоских антенн с различными формами апертур (естественными амплитудными распределениями).

В табл. 2.2 приведены данные по комплексу параметров антенн с искусственными и естественными амплитудными распределениями, см. также [2, 35, 44].

Значения функций Бесселя можно определить, пользуясь графиками, приведенными на рис. 2.15, и рекуррентным соотношением:  $(2n/z) \mathcal{J}_n(z) = \mathcal{J}_{n-1}(z) + \mathcal{J}_{n+1}(z)$ .

Таблица 2.1. К определению ширины основного лепестка максимума ХН

R, %	Справедливо при $D/\lambda$	$\chi$ при форме апертуры			
		круглой	прямоугольной	ромбической, треугольной	квадратной (в плоскости диагонали в зависимости от стороны)
0,7	$> 1,0$	58,5	50,5	76,7	40,0
0,5	$> 1,25$	80,0	72,0	103,0	52,0
0,3	$> 1,5$	100,0	86,0	133,5	66,0
0,1	$< 1,75$	128,0	108,0	172,0	83,0
0	$> 2,0$	140,0	115,0	249,0	115,0

## § 2.5. КОНИЧЕСКИЕ РЕФЛЕКТОРНЫЕ АНТЕННЫ, АНТЕННЫ С КОЛЬЦЕВОЙ АПЕРТУРОЙ

Коническая антенна преобразует плоские волны в цилиндрические (и обратно). Для выполнения такой задачи антенна должна состоять из конусного отражателя с углом расхождения при вершине конуса, равным  $90^\circ$ , и цилиндрического облучателя небольшого диаметра, расположенного вдоль оси симметрии (высоты) конуса (рис. 2.14). В таком варианте исполнения длины 1—2—3 всех лучей одинаковы. Применение конических антенн целесообразно в тех случаях, когда необходимо иметь ХН с малой шириной основного лепестка. Преимущество такой антенны (если нет ограничений по удельной акустической мощности) перед плоским круглым поршнем заключается в том, что большая ее часть может быть выполнена из от-

ражающего (пассивного) материала и только незначительная (облучатель) — из пьезоактивного. Реальные отношения диаметров  $d$  облучателя и  $D$  апертуры конуса должны лежать в пределах  $d/D = = 2r/2R = 0,05 \div 0,4$ . Поскольку расстояния от облучателя до поверхности конуса (вдоль его высоты) разные, в апертуре конуса в любом ее сечении образуется амплитудное распределение вида  $\rho^{-1/2}$ , где  $\rho$  — текущий радиус апертуры конуса. Расчет нормированной к единице в осевом направлении характеристики направленности конической антенны может быть выполнен с использованием нижеследующего выражения, справедливого при  $t \geq 0,05$  [35],

$$R(\theta) = 1,41 \{ \mathcal{I}_1(z) [0,84z^{-1} + 0,39S_0(z)] + + 0,25\mathcal{I}_0(z) [1 - 1,57S_1(z)] - t\mathcal{I}_1(tz) [0,84z^{-1} + + 0,39S_0(tz)] + 0,25t\mathcal{I}_0(tz) [1 - 1,57S_1(tz)] \},$$

где  $z = \pi D/\lambda \sin \theta$ ; 1,41 — нормирующий множитель;  $\mathcal{I}_0$ ,  $\mathcal{I}_1$ ,  $S_0$ ,  $S_1$  — табулированные функции Бесселя и Струве нулевого и первого порядков (рис. 2.15 и 2.16) [54]. При  $z = 0$  выражение для  $R(\theta)$  следует полагать равным единице (рис. 2.17).

Расчет параметров антенны с кольцевой апертурой и равномерным амплитудным распределением амплитуд колебательной скорости возможен по формуле  $R(\theta) = 2 \{ [\mathcal{I}_1(z) - \mathcal{I}_1(tz) t]/2(1-t^2) \}$ . При  $z = 0$  это выражение равно единице (рис. 2.18).

Коэффициент усиления конической антенны при  $D > 4\lambda$  может быть определен с помощью формулы  $K_p = [(D^2 - d^2)/2Dd]^2$ .

Чувствительность рефлекторной антенны  $\gamma_p$  и электроакустический коэффициент полезного действия  $\eta_{p\text{эа}}$  можно найти, пользуясь формулами:  $\gamma_p = K_p \gamma_0 B$ ,  $\eta_{p\text{эа}} = \eta_{o\text{эа}} B^2$ , где индекс «о» означает принадлежность параметра облучателю,  $B$  — коэффициент отражения от поверхности зеркала по полю.

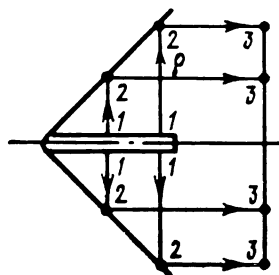


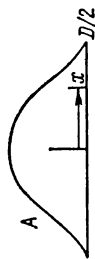
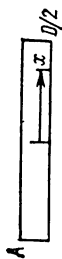
Рис. 2.14. К пояснению построения конической рефлекторной антенны

## § 2.6. ПЛОСКИЕ АНТЕННЫ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Выше рассмотрены свойства плоских антенн, расположенных заподлицо с бесконечно жестким бесконечно протяженным плоским экраном и антенны без экранов, но больших волновых размеров. При таких условиях можно определить направленность односторонней плоской антенны только в пределах текущих углов  $\theta = 0 \pm 90^\circ$ . В реальной действительности антенны никогда не располагаются в бесконечно протяженных экранах. Разработчику требуется знать также и дифракционную часть ХН, в области углов  $\theta = 180 \pm 90^\circ$ . Ко всему прочему антенны не всегда встраиваются в экраны, а последние могут иметь различные импедансные свойства — быть жесткими, мягкими, поглощающими или иными. Необходимо уметь определять

Таблица 2.2. Параметры направленности плоских антенн с амплитудными распределениями

Форма апертуры	Вид амплитудного распределения $A$	Ширина ХН %, для $\Delta\theta_0$	Ширина ХН %, для $\Delta\theta_{0,7}$	Первый боковой лепесток $\theta$ , %	Падение коэффициента концентрации отн. $4\pi SA^{-2}$	Формула ХН
Прямоугольная	const	115	50,5	22	1	$\sin z/z$
	$1-4(1-\Delta)\frac{x^2}{D^2}$	122	53,8	16	0,99	$\frac{\sin z}{z} + (1+\Delta) \times$ $\times \frac{d^2}{dz^2} \left( \frac{\sin z}{z} \right)$
	$\Delta = 0,8$					
	$\Delta = 0,5$					
	$\Delta = 0$	164,5	66	9,3	0,83	
$\cos \frac{\pi x}{D}$	173,7	68,8	7	0,81	$\frac{\cos z}{z^2 - (\pi/2)^2}$	
$\cos^2 \frac{\pi x}{D}$	230	83,2	2,5	0,667	$\frac{\sin z}{z(z^2 - \pi^2)}$	
$\cos^3 \frac{\pi x}{D}$	287,5	95,2	1	0,575	$\frac{\cos z}{[z^2 - (\pi/2)^2][z^2 - (3\pi/2)^2]}$	
$\cos^4 \frac{\pi x}{D}$		111,2	0,4	0,515		
$\left[ 1 - \left( \frac{2x}{D} \right)^2 \right]^m$ $m = -0,5$			42,4	40		







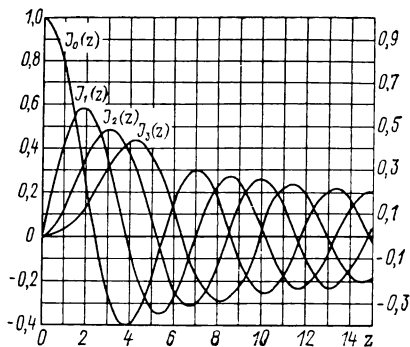


Рис. 2.15. Функции Бесселя нулевого, первого, второго и третьего порядков

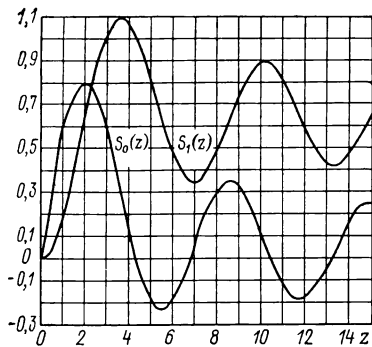


Рис. 2.16. Функции Струве нулевого и первого порядков

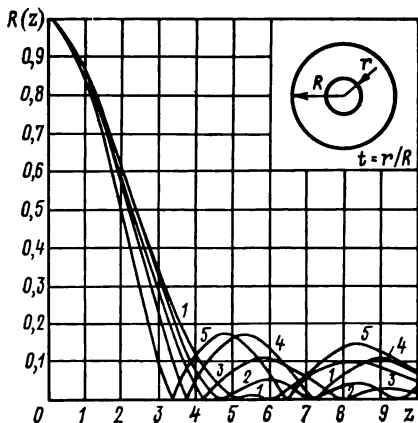


Рис. 2.17. Зависимости функций, определяющих ХН конической рефлекторной антенны, от аргумента при  $t$   
 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,4;  
 5 — 0,5

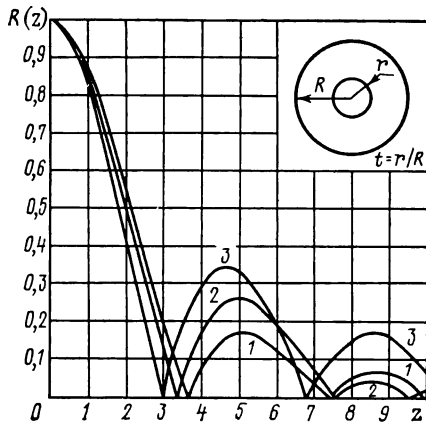


Рис. 2.18. Зависимости функций, определяющих ХН антенны с кольцевым раскрытием и равномерным амплитудным распределением, от аргумента при  $t$   
 1 — 0,2; 2 — 0,4; 3 — 0,6

направленность антенн не только больших, но и малых волновых размеров. Такие антенны используются в качестве самостоятельных устройств или являются составными частями многоэлементных решеток. Возникают задачи, связанные с необходимостью учета влияния: конечности размеров — диаметра и толщины, взаимного расположения активных и пассивных элементов антенного устройства, свойств экрана.

Перечисленные факторы существенно воздействуют на ХН. Анализ же направленных свойств с учетом отмеченных моментов представляет существенные трудности, так как невозможны инженерные расчеты и простая регуляризация закономерностей при экспериментальных исследованиях (из-за отсутствия дифракционных эффектов и их зависимости от многих условий), необходимы высокая точность расчета и чистота постановки эксперимента.

Изучение возможных методов решения такой задачи приводит практически к единственному точному решению — с помощью собственных функций, представленных в ортогональных координатах, конформных с телом, являющимся расчетной моделью. Такой системой для модели в виде концентрически расположенных поршня и экрана могут служить сплюснутые сфероидальные координаты (рис. 2.19). Они образуют семейство сплюснутых софокусных эллипсоидов ( $\xi = \text{sh } u, \text{ var} : 0 \div \infty$ ) и однополостных гиперболоидов вращения ( $\eta = \cos v, \text{ var} : -1 \div +1$ ). Декартовы координаты связаны с ними следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= F \sqrt{(1-\eta^2)(1+\xi^2)} \cos \varphi = F \text{ch } u \sin v \cos v; \\ y &= F \sqrt{(1-\eta^2)(1+\xi^2)} \sin \varphi = F \text{ch } u \sin v \sin \varphi; \\ z &= F \text{sh } u \cos v. \end{aligned}$$

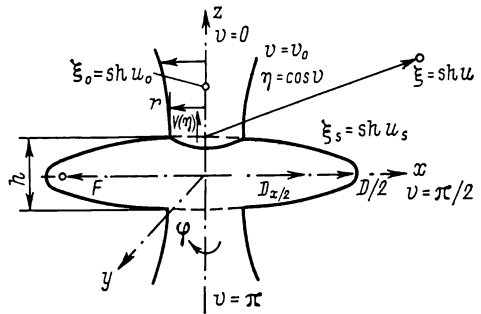


Рис. 2.19. Расчетная модель для определения ХН плоских антенн конечных размеров

Сплюснутые сфероидальные координаты могут вырождаться:

при  $\xi = 0$  образуется бесконечно тонкий диск радиусом  $F$  в плоскости  $xy$ ; при  $\eta = 0$  получается плоскость  $xy$  с отверстием радиусом  $F$ . Применение сфероидальных координат обеспечивает точное решение волнового уравнения по методу разделения переменных и представление в качестве фундаментальных сплюснутых угловых  $R_{mn}^{(1)}$  ( $-jkF, \eta$ ) первого рода и радиальных  $R_{mn}^{(1)(3)}$  ( $-jkF, j\xi$ ) первого и третьего рода функций [24]. Общее решение волнового уравнения для осесимметричной модели имеет вид

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} a_n S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v) R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \text{sh } u), \quad (2.4)$$

где  $\Phi$  — потенциал поля расчетной модели;  $F$  — фокусное расстояние;  $\text{sh } u = 0$  для тонкого диска. В дальней зоне Фраунгофера  $\cos v \rightarrow \cos \theta, \text{sh } u \rightarrow \infty, R_{0n}^{(3)} \rightarrow \exp[-j(\pi/2)(n+1)]$  с точностью до постоянной величины. Коэффициенты разложения  $a_n$  неизвестны. Их можно найти с помощью граничных условий, задавая распределение амплитуд нормальной составляющей колебательной скорости  $V$  на поверхности поршневого вибратора радиусом  $r =$

$= F \operatorname{ch} u \sin v_0$  и распределение колебательной скорости  $V$ , давления  $P$  или импеданса  $Z$  на остальной части поверхности — поверхности экрана. Если принять, что экран жесткий (импеданс значительно больше волнового сопротивления  $\rho c$  воды), необходимо задать на нем скорость  $V = 0$ . Если экран мягкий (импеданс значительно меньше  $\rho c$  воды), полагается  $P = 0$ . Для поглощающего экрана можно задать импеданс  $Z = \rho c$ . В других случаях задаются конкретные значения импеданса. Математически граничные условия выглядят так: при  $v \leq v_0$ ,  $V = -\partial\Phi/\partial n = -\partial\Phi/h\xi\partial\xi = A(v)$ , при  $v \geq v_0$ ;  $V = -\partial\Phi/h\xi\partial\xi = 0$  для жесткого экрана;  $P = \rho(\partial\Phi/\partial t) = 0$  для мягкого экрана;  $P/V = Z$  для импедансного экрана. Здесь  $n$  — нормаль к поверхности модели,  $h\xi = F \sqrt{(\operatorname{sh}^2 u + \cos^2 v)/(\operatorname{sh}^2 u + 1)}$  — коэффициент Ламе — перехода от дифференцирования по нормали к поверхности к дифференцированию по радиальной координате. Заменяя в этих выражениях потенциал  $\Phi$  его разложением по сфероидальным функциям, получаем для граничных условий следующие уравнения:

$$-\frac{1}{F \sqrt{\frac{\operatorname{sh}^2 u + \cos^2 v}{\operatorname{sh}^2 u + 1}}} \sum_{n=0}^{\infty} a_n S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v) [R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)]' = A(v); \quad (2.5)$$

$$\frac{j\omega\rho \sum_{n=0}^{\infty} a_n S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v) R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)}{\left[ F \sqrt{\frac{\operatorname{sh}^2 u + \cos^2 v}{\operatorname{sh}^2 u + 1}} \right]^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} a_n S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v) [R_{0n}^{(3)} \times (-jkF, j \operatorname{sh} u_s)]'} = Z. \quad (2.6)$$

Определение коэффициентов  $a_n$  разложения может быть выполнено, например, методом коллокации [18], в соответствии с которым задаются дискретные численные значения граничных условий вдоль поверхности — в точках коллокации. Поскольку картина поля осесимметричная, выбор точек коллокации можно осуществлять путем разбиения углового интервала  $0-180^\circ$  на  $N$  равных промежутков  $v_i = i(\pi/N)$ , где  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ . Меняя значения  $i$  и используя равенства (2.5) и (2.6), получаем систему алгебраических уравнений для определения  $a_n$ . В выражениях (2.5) и (2.6) следует заменить  $v$  на  $i(\pi/N)$ , а  $\infty$  на  $N-1$ . Иногда применяют конструкции, состоящие из экрана и ненаправленного или слабонаправленного вибратора, расположенного не на поверхности экрана, а отстоящего от экрана на некоторое расстояние, в частности, по оси его симметрии. В этом случае поле  $\Phi$  модели можно представить в виде суперпозиций полей  $\Phi_0$  вибратора и рассеянного  $\Phi_s$  экраном. Поле вибратора — источника сферических волн в разложении по сплюсненным сфероидальным

функциям может быть представлено выражением

$$\Phi_0 = 2jk \sum_{n=0}^{\infty} \frac{S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v_0)}{N_{0n}(-jkF)} R_{0n}^{(1)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_0) S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos \theta) \times \\ \times R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u). \quad (2.7)$$

Поле, рассеянное экраном, адекватно выражению (2.4). В общем случае граничные условия при  $\operatorname{sh} u = \operatorname{sh} u_s$  определяются равенством

$$Z = (P_0 + P_s)/(V_0 + V_s). \quad (2.8)$$

После подстановки в (2.8)  $\Phi_0$  и  $\Phi_s$  и почленного сравнения сумм определяются коэффициенты  $a_n$ , и получается выражение для расчета поля модели

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_s = 2jk \sum_{n=0}^{\infty} \frac{S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v_0)}{N_{0n}(-jkF)} R_{0n}^{(1)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_0) S_{0n}^{(1)} \times \\ \times (-jkF, \cos \theta) R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u) - 2j \sum_{|n|=0}^{\infty} \frac{S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos v_0)}{N_{0n}(-jkF)} \times \\ \times R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_0) S_{0n}^{(1)}(-jkF, \cos \theta) R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s) \times \\ \times \frac{jZ_y [R_{0n}^{(1)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)]' - kh_{\xi} R_{0n}^{(1)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)}{jZ_y [R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)]' - kh_{\xi} R_{0n}^{(3)}(-jkF, j \operatorname{sh} u_s)}, \quad (2.9)$$

где  $\cos v_0$ ,  $\operatorname{sh} u_0$  — координаты положения центра вибратора;  $\operatorname{sh} u_s$  — координата поверхности экрана;  $\theta$  — текущий угол ХН;  $Z_y = Z/\rho c$  — удельный импеданс;  $N_{0n}$  — норма функции.

### 2.6.1. Конечный односторонний поршень с равномерным возбуждением круглой апертуры, экранированный с тыльной стороны жестким и мягким экранами

Анализ направленных свойств конечных антенн начнем с модели, у которой  $r = D/2$ . Первый вытекающий из сопоставления кривых (рис. 2.20 и 2.21) вывод заключается в том, что совпадение характеристик, полученных разными способами расчета, независимо от свойств экрана, начинается лишь при  $2r = D > 2\lambda$ . При  $D \sim 3-4\lambda$  исчезают различия в направленности в переднем полупространстве между поршнями, экранированными жестким и мягким экранами (см. кривые 5, 6 и 8—10 на рис. 2.20 и 2.21). ХН поршня малых волновых размеров,  $r < 0,5\lambda$ , с жестким тыльным экраном более острые, чем расположенные в бесконечно протяженном жестком экране (кривые 1—3 на рис. 2.20). При  $r < 0,5$  мягкий тыльный экран оказывает влияние, отличное от жесткого, и в пределах основного лепестка характеристики острее, чем с жестким экраном, а боковые и тыльные лепестки

меньше. При больших диаметрах поршня влияние мягкого экрана сказывается только на уменьшение тыльных лепестков. В случае  $r = 0,75 \lambda$  формируются ХН переходного типа, когда начинают вырисовываться боковые лепестки.

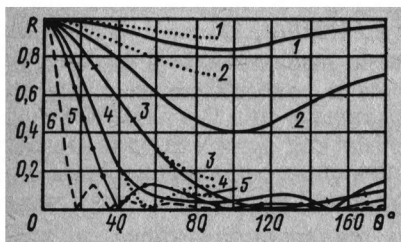


Рис. 2.20. ХН конечного одностороннего поршня радиусом  $r$   
 1 —  $0,125\lambda$ ; 2 —  $0,25\lambda$ ; 3 —  $0,5\lambda$ ; 4 —  $0,75\lambda$ ; 5 —  $\lambda$ ; 6 —  $2\lambda$ . Радиус тонкого экрана с импедансом  $Z = \infty$   
 $R = r$ . Пунктир — ХН поршня в бесконечно протяженном экране  $2\beta_{z,1}(\alpha)/z$

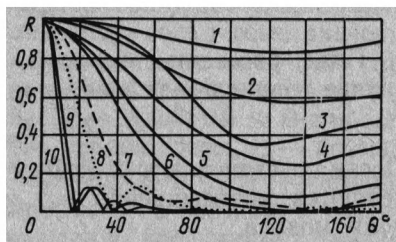


Рис. 2.21. ХН конечного одностороннего поршня радиусом  $r$   
 1 —  $0,0625\lambda$ ; 2 —  $0,125\lambda$ ; 3 —  $0,1875\lambda$ ; 4 —  $0,25\lambda$ ; 5 —  $0,375\lambda$ ; 6 —  $0,5\lambda$ ; 7 —  $0,75\lambda$ ; 8 —  $\lambda$ ; 9 —  $0,75\lambda$ ; 10 —  $2\lambda$ . Радиус тонкого экрана, с импедансом  $Z = 0, R = r$

### 2.6.2. Односторонний поршень, концентрический с конечным жестким экраном

При малых волновых размерах поршня ( $r \sim 0,25\lambda$ ) в экране радиусом  $D/2 = R \leq 0,75\lambda$  у ХН наблюдается снижение уровня в боковых и тыльном направлениях в сравнении со случаями, когда

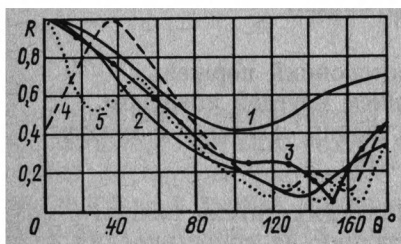


Рис. 2.22. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,25\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = \infty$  радиусом  $R$   
 1 —  $0,25\lambda$ ; 2 —  $0,5\lambda$ ; 3 —  $0,75\lambda$ ; 4 —  $\lambda$ ; 5 —  $1,5\lambda$

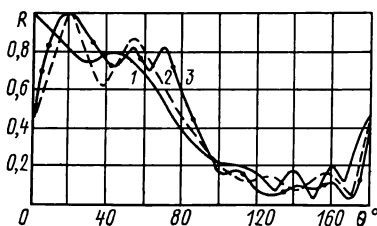


Рис. 2.23. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,25\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = \infty$  радиусом  $R$   
 1 —  $1,75\lambda$ ; 2 —  $2\lambda$ ; 3 —  $5\lambda$

$r = R = D/2$  (сравним кривые 1—3 на рис. 2.22). Экран радиусом  $0,5\lambda$  предельно уменьшает ширину основного лепестка и снижает уровень тыльного примерно до 30 % (кривая 2). При экране радиусом  $0,75\lambda$  основной лепесток шире и в его пределах образуются «плечи» с уровнем  $\sim 25\%$  в направлениях  $\theta = 100-130^\circ$ . Тыльный лепесток

увеличивается (кривая 3). Дальнейшее увеличение волнового размера экрана вызывает расширение основного лепестка и угловые осцилляции его уровня. При  $R = \lambda$  (кривая 4 на рис. 2.22) в аксиальном направлении возникает провал. Он тем глубже, чем меньше волновой размер  $r/\lambda$  поршня. Образуется воронкообразная характеристика направленности. С последующим ростом диаметра экрана число экстремумов в пределах основного лепестка увеличивается. Явно выражена закономерность: если диаметр экрана кратен нечетному числу волн, в аксиальном направлении возникает максимум, если — четному, образуется минимум (см. рис. 2.22 и 2.23). Начиная с размера  $R = \lambda$ ,

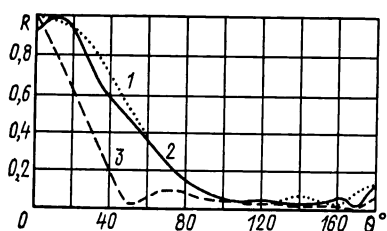


Рис. 2.24. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,5\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = \infty$  радиусом  $R$   
 1 —  $\lambda$ ; 2 —  $2\lambda$ ; 3 — при  $r = 0,75\lambda$  и  $R = 2\lambda$

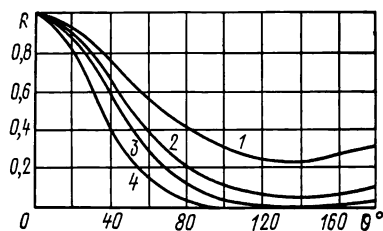


Рис. 2.25. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = 0$  радиусом  $R$   
 1 —  $0,25\lambda$ ; 2 —  $0,5\lambda$ ; 3 —  $\lambda$ ; 4 —  $5\lambda$

в тыльном полупространстве возникают боковые лепестки, уровень которых лежит в пределах от 10 до 20%. Количество лепестков увеличивается с увеличением  $R$ , а ширина их уменьшается. Уровень тыльного лепестка, расположенного в направлении  $\theta = 180^\circ$ , при  $R \geq 0,75\lambda$  достигает 45% (при меньших размерах поршня он может быть выше — до 50%). Ширина его зависит от радиуса экрана, а уровень — не зависит.

На рис. 2.24 показаны характеристики направленности поршня радиусами  $r = 0,5\lambda$  и  $0,75\lambda$  в экранах радиусами  $R = \lambda$  и  $2\lambda$ . Из сопоставления кривых этого рисунка с кривыми 3 и 4 на рис. 2.20 видно, что при таких размерах поршня влияние концентрического с ним жесткого экрана полностью не устраняется. В случае  $r = 0,5\lambda$  ХН поршня с концентрическим экраном шире, а в случае  $r = 0,75\lambda$  уже, чем у поршня, экранированного только с тыльной стороны. Имеются различия в форме и уровнях боковых и тыльных лепестков.

### 2.6.3. Односторонний поршень, концентрический с конечным мягким экраном

Изменение радиуса  $R$  мягкого экрана от  $0,25\lambda$  до  $5\lambda$  вызывает уменьшение ширины ХН одностороннего поршня малых волновых размеров примерно в два раза и существенное уменьшение уровня тыльного излучения (рис. 2.25). ХН поршня радиусом  $r = 0,5\lambda$

(рис. 2.26) сужаются в значительной степени и при этом регулярности в монотонности сужения не наблюдается. На рис. 2.27 показана трансформация ХН поршня радиусом  $r = 0,75\lambda$ . В этом случае начинают формироваться первые боковые лепестки. Увеличение радиуса  $R$  экрана от  $0,75\lambda$  до  $5\lambda$  сопровождается сужением основного лепестка. Уровень бокового поля в этих случаях оказывается более высоким, чем, например, у поршня радиусом  $r = 0,5\lambda$ . Экран радиусом  $R = 1,75\lambda$  вызывает аномальное расширение характеристики направ-

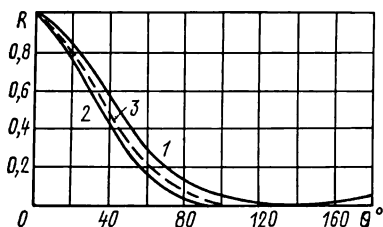


Рис. 2.26. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,5\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = 0$  радиусом  $R$   
1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $2\lambda$

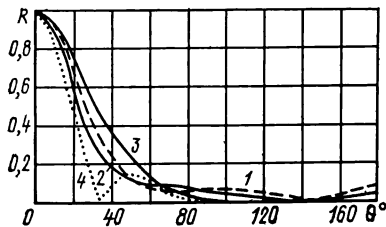


Рис. 2.27. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,75\lambda$  в конечном тонком экране с импедансом  $Z = 0$  радиусом  $R$   
1 —  $0,75\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,75\lambda$ ; 4 —  $5\lambda$

ленности, а боковое и тыльное излучения уменьшаются, сравним кривые 1, 2 и 3. Экран радиусом  $R = 5\lambda$  способствует дальнейшему сужению основного лепестка и формированию первых боковых лепестков с уровнем 16% (кривая 4).

#### 2.6.4. Односторонний поршень, концентрический с конечным экраном различной толщины

Выше рассматривались ХН для случаев, когда толщины поршня и экрана малы в сравнении с длиной волны (при расчете они принимались бесконечно тонкими). Возникает вопрос о возможных изменениях ХН в зависимости от конечности толщины экрана, так как на практике последние по толщине обычно сравнимы с длиной волны. Такие расчетные ХН показаны на рис. 2.28. При расчетах экран представлялся в виде сильно сплюсненного сфероидального тела. По кривым 1—3 видно, что увеличение толщины жесткого экрана вызывает некоторое расширение основного лепестка и уменьшает аксиальный провал и осцилляции уровня в пределах основного лепестка. Воздействие на тыльный лепесток практически отсутствует. При мягком экране с увеличением его толщины наблюдаются незначительное расширение основного лепестка и рост бокового поля (кривые 4, 5).

На рис. 2.29 приведены экспериментальные модельные ХН, полученные для физически точной модели с точечным источником на поверхности экрана сферических волн в условиях свободного поля. Экран стальной плоский разной толщины.



Из рассмотрения экспериментальных и теоретических зависимостей видно, что при толщине экрана  $\sim 0,4\lambda$  экспериментальная ХН близка к расчетной при бесконечно тонком экране. Совпадают по угловым положениям экстремальные значения. Близки по величинам боковые и тыльные лепестки и аксиальные уровни в области основного лепестка. Сопоставление кривых 3 (см. рис. 2.28) и 1 (см. рис. 2.29) приводит к заключению о том, что жесткость стального экрана приближается к абсолютной при его волновой толщине  $h \geq 0,4\lambda$  (где  $\lambda$  — длина волны в воде). Уменьшение же глубины осцилляций уровня в области основного лепестка, полученное для рас-

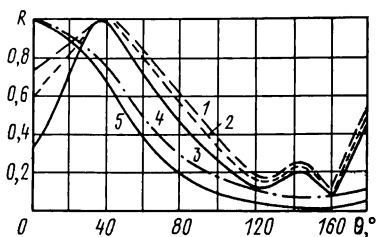


Рис. 2.28. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном экране радиусом  $R = \lambda$  толщиной  $h$   
 1 —  $0,3\lambda$ ; 2 —  $0,2\lambda$ ; 3 —  $0\lambda$  — при импедансе  $Z = \infty$ ; 4 —  $0,3\lambda$ ; 5 —  $0\lambda$  — при импедансе  $Z = 0$

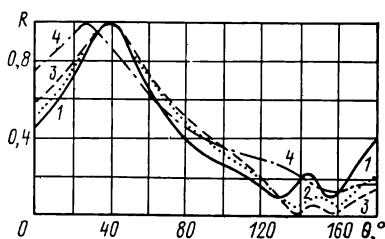


Рис. 2.29. ХН точечного источника со стальным экраном конечных размеров радиусом  $R = \lambda$  при различной толщине  $h$   
 1 —  $0,38\lambda$ ; 2 —  $0,25\lambda$  — расчет; 3 —  $0,13\lambda$ ; 4 —  $0,06\lambda$  — эксперимент

четной модели, очевидно, следует объяснять рассеянием от воздействия неточности фазовой суперпозиции при интерференции от обладающей переменной кривизной фронтальной поверхности экрана. Уменьшение толщины экспериментального экрана сопровождается подъемом аксиального уровня и уменьшением тыльного и боковых лепестков при толщинах экрана, снижающихся до значений  $\sim 0,1\lambda$ .

Судя по поведению уровня дифракционных лепестков, можно сделать вывод о том, что жесткость стального экрана таких толщин уменьшена. Интересно отметить, что даже весьма тонкий стальной экран толщиной  $h \sim 0,06\lambda$  обеспечивает формирование подобной вышеупомянутым ХН. Подъем уровня в области углов  $\theta > 100^\circ$  по всей вероятности можно объяснить появлением изгибных колебаний.

### 2.6.5. Односторонний вибратор с конечными экранами различной формы

Проведем здесь сопоставление характеристик направленности точечного источника сферических волн, находящегося на поверхности конечного плоского экрана различной формы. Поскольку точное решение для модели с экраном, форма которого отлична от круглой, невозможно, изучались результаты эксперимента, проведенного с физически точной моделью в условиях свободного поля. Были исполь-

зованы плоские стальные экраны одинаковой толщины  $h = 0,13\lambda$ . Сопоставлялась направленность моделей с круглым 4, квадратным 1, ромбическим 2 и прямоугольным 3 экранами. У модели с прямоугольным экраном измерялись ХН в двух взаимно перпендикулярных, параллельных сторонам плоскостях, с квадратным экраном — в плоскостях, параллельной стороне и диагональной (рис. 2.30, а). Последние две ХН (модели с квадратным экраном) и ХН прямоугольного экрана в плоскости меньшего размера практически одинаковы — кривые 1, 2, 3. У этих ХН в сравнении с получающейся при круглом эк-

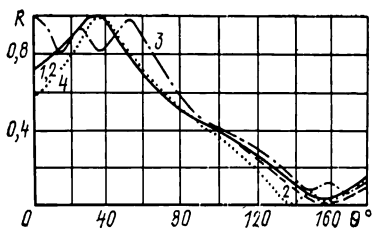


Рис. 2.30. Экспериментальные ХН точечного источника со стальным экраном конечных размеров различной формы при толщине  $h = 0,13\lambda$  и размерах сторон и диаметре  $D$

1, 2, 4 —  $2\lambda$ ; 3 —  $5\lambda \times 2\lambda$

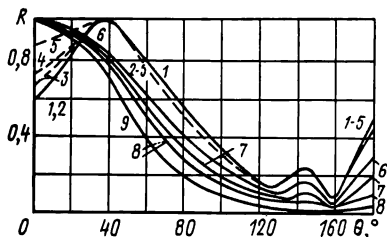


Рис. 2.31. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном локально-импедансом экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с удельным реальным импедансом  $Z$

1 —  $\infty$ ; 2 —  $(+1)$ ; 3 —  $(\pm 3)$ ; 4 —  $(-1)$ ; 5 —  $(\pm 0,3)$ ; 6 —  $(+0,08)$ ; 7 —  $(+0,04)$ ; 8 —  $(+0,02)$ ; 9 —  $(0 \pm 0,014)$

ране (кривая 4) глубина аксиального провала меньше, отсутствуют боковые лепестки и выше ореол в области углов  $\theta = 100-140^\circ$ . Характеристика направленности с прямоугольным экраном в плоскости большого размера на углах более  $90^\circ$  совпадает с ХН модели с квадратным экраном. В области углов, меньших  $90^\circ$ , уровню основного лепестка присущи угловые осцилляции. Число экстремумов такое же, как и в случае равновеликого круглого экрана, а глубина осцилляций меньше (кривая 3).

### 2.6.6. Односторонний поршень, концентрический с конечным локально-импедансным экраном

С целью приближения к реальным конструкциям расчетная модель при анализе направленных свойств одностороннего поршня с импедансным экраном принята конечной по толщине  $h = 0,2\lambda$  и  $0,4\lambda$ , радиус поршня взят равным  $r = 0,125\lambda$  и  $0,25\lambda$ , а радиус экрана  $R = \lambda$ . Расчеты выполнены для импеданса  $Z$  — реального и мнимого, положительного и отрицательного при изменении абсолютного значения его в широких пределах. Под положительным импедансом системы поршень — экран здесь понимается импеданс с такими свойствами, при которых нормальные составляющие колебательных скоро-

стей на поверхностях поршня и экрана синфазны. Отрицательный импеданс будем характеризовать противофазным соотношением скоростей. При абсолютных значениях нормированных к  $\rho c$  воды реальных импедансов экранов, изменяющихся в пределах от  $\pm 1$  до  $\infty$ , ХН независимо от знака совпадают или близки к ХН поршня в абсолютно жестком экране (рис. 2.31, кривые 1—4). При значении импеданса  $Z = \pm 0,3$  уровень ХН в направлении  $\theta = 0^\circ$  приближается к 0,9, дифракционный же лепесток сохраняет высокий уровень. Интересно отметить, что у поршня в экране с импедансом, равным волновому сопротивлению воды (поглощающего типа), ХН почти точно

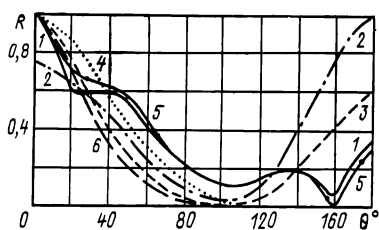


Рис. 2.32. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном локально-импедансном экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с удельным реальным импедансом  $Z$

1 — (— 0,08); 2 — (— 0,06); 3 — (— 0,04); 4 — (— 0,02); 5 — (— 0,08); 6 — (— 0,04) радиусом  $r = 0,25\lambda$ .

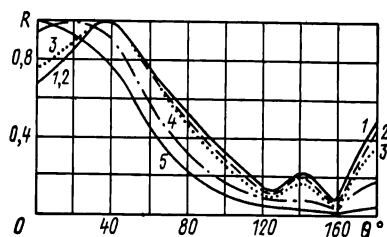


Рис. 2.33. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном локально-импедансном экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с удельным мнимым импедансом  $Z$

1 — (— 10); 2 — (— 1); 3 — 0; 4 — (— 0,08); 5 — (— 0,02)

совпадает с ХН поршня в абсолютно жестком экране. При значениях импеданса экрана  $Z = 0,08$  ХН сужается и уже не имеет провала в аксиальном направлении (кривая 6). Ширина основного лепестка уменьшается, снижаются уровни дифракционных лепестков. С уменьшением абсолютной величины положительного импеданса до нуля ХН еще больше сужается, а дифракционные лепестки исчезают.

В ХН поршня с экраном при значениях импеданса  $Z$  от  $-0,08$  до  $-0,02$  наблюдаются аномалии. При  $Z = -0,08$  (рис. 2.32, кривая 1) у основного лепестка ХН имеется относительно острый всплеск, занимающий область  $\theta = 0-20^\circ$ . Уровень основного лепестка ХН направленности поршня в экране с импедансом  $Z = -0,06$  в нулевом направлении уменьшается до 0,75 (кривая 2), а тыльный лепесток расширяется и при  $\theta = 180^\circ$  достигает по уровню 100 %. При экране с импедансом  $Z = -0,04$  ХН трансформируется так, что основной лепесток в нулевом направлении вновь становится равным 1, а тыльный уменьшается до 0,6 (кривая 3). При значении импеданса  $Z = -0,02$  (кривая 4) характеристика приближается по форме к характеристике поршня в абсолютно мягком экране, тыльный лепесток практически отсутствует. С увеличением размера поршня  $z$  от  $0,125\lambda$  до  $0,25\lambda$  при импедансе  $Z = -0,08$  направленные свойства изме-

яются несущественно, а при  $Z = -0,04$  — весьма резко: исчезает большой тыльный лепесток, сравним кривые 1 и 5, 3 и 6.

ХН поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  с отрицательным мнимым импедансом (рис. 2.33) подобны ХН поршня в экране с реальным импедансом, изображенным на рис. 2.31. Имеются особенности в изменении характеристик направленности поршней в экранах с положительным мнимым импедансом. При больших абсолютных значениях импеданса  $Z = 10j - 1j$  (кривые 1, 2 на рис. 2.34) ХН похожи на характеристики поршня в жестком экране (см. рис. 2.31). Изменение  $Z$  до  $0,3j$  вызывает увеличение уровней дифракционных лепестков. При  $Z = 0,16j$

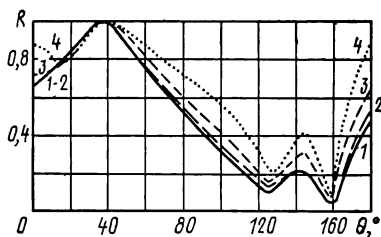


Рис. 2.34. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с удельным импедансом  $Z$

1 — (+ 10); 2 — (+ 1); 3 — (+ 0,3);  
4 — (+ 0,16)

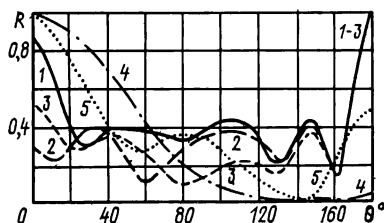


Рис. 2.35. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с удельным мнимым импедансом  $Z$

1 — (+ 0,08); 2 — (+ 0,04); 3 — (+ 0,02); 4 — (+ 0,01); 5 — (+ 0,02)  
при  $h = 0,4\lambda$

уровень тыльного лепестка существенно увеличивается, увеличивается лепесток, расположенный на угле  $\theta = 145^\circ$ , растет ширина основного лепестка. Вместо минимума в аксиальном направлении возникает максимум. При мнимых положительных импедансах, начиная со значений  $Z = 0,01j$  и меньших, характеристики направленности по виду аналогичны характеристикам поршней с абсолютно мягкими экранами (рис. 2.35, кривая 4). При значениях импеданса, лежащих в пределах  $Z = 0,16j \div 0,01j$ , наблюдается аномалия направленных свойств с резкими критическими изменениями. При толщине модели  $h = 0,2\lambda$  уменьшается уровень излучения в аксиальном направлении в переднее полупространство. Максимального уровня достигает тыльный лепесток. В боковых направлениях уровень поля сохраняется высоким. Увеличение толщины модели до  $h = 0,4\lambda$  уменьшает тыльный лепесток и увеличивает аксиальный в переднем полупространстве (кривая 5).

### 2.6.7. Односторонний поршень, концентрический с переменным импедансным экраном

Как показано выше, характер импеданса существенно влияет на направленность поршня. В практике применения таких устройств возникают вопросы, какие части экрана и какой вклад вносят в ха-

рактическую направленности во фронтальном и тыльном полупространствах. Проанализировать это можно, придавая разным участкам экрана различные импедансные свойства. Комбинируя отдельные части экрана из акустически жестких и мягких элементов, можно составить суждение о закономерностях изменения направленности, поскольку воздействие жестких и мягких экранов наиболее изучено и понятно. Пользуясь результатами такого анализа, можно с большей уверенностью проектировать подобные антенные устройства, задавая необходимые изменения импеданса по поверхности экрана для получения желаемой направленности. Как видно из сопоставления кривых 1, 2, 3 (рис. 2.36), если тыльная сторона экрана акустически абсолютно

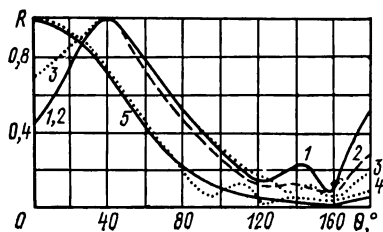


Рис. 2.36. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном экране радиусом  $R = \lambda$ , толщиной  $h = 0,13\lambda$  (расчет  $\text{=====}$ ) и  $h = 0,13\lambda + 0,13\lambda$  (эксперимент  $\text{.....}$ ) с удельным локальным импедансом

1 —  $Z = \infty$ ; 2, 3 — фронт  $Z = \infty$ , тыл  $Z = 0$ ; 4, 5 — фронт  $Z = 0$ , тыл  $Z = \infty$

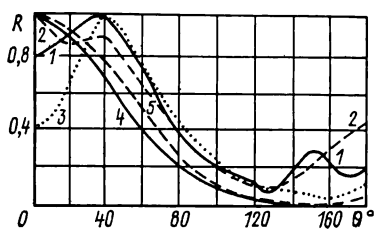


Рис. 2.37. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,125\lambda$  в конечном локально-импедансном экране толщиной  $h = 0,2\lambda$ , радиусом  $R = \lambda$  с переменным по радиусу удельным импедансом

1 —  $Z = \infty$  при  $R_x < 0,875\lambda$   $Z = 0$  при  $R_x > 0,875\lambda$ ; 2 —  $Z = 0$  при  $R_x < 0,875\lambda$ ,  $Z = \infty$  при  $R_x > 0,875\lambda$ ; 3 —  $Z = \infty$  при  $R_x < 0,625\lambda$ ,  $Z = 0$  при  $R_x > 0,625\lambda$ ; 4 —  $Z = 0$  при  $R_x < 0,625\lambda$ ;  $Z = \infty$  при  $R_x > 0,625\lambda$ ; 5 —  $Z = 0, \infty$  с шагом  $R_x = 0,125\lambda$

мягкая, а передняя — акустически абсолютно жесткая, ХН поршня в таких экранах в пределах основного лепестка практически совпадают в переднем полупространстве и в боковых направлениях до углов примерно  $120^\circ$  с ХН поршня в жестком экране. Боковые и тыльные лепестки уменьшаются в 1,5—2 раза. Подъем уровня в аксиальном направлении у экспериментальной характеристики и меньший уровень ее тыльного лепестка объясняются не абсолютной жесткостью стального экрана толщиной  $h = 0,13\lambda$  (см. рис. 2.29). Если экран выполнен из мягкого материала или таким образом, что фронтальная его сторона является акустически мягкой, а тыльная жесткой, ХН при таких экранах одинаковы (см. кривые 4, 5 и рис. 2.28).

На рис. 2.37 представлены ХН для случая, когда внутренняя часть экрана в пределах от  $R_x = 0,125\lambda$  до  $R_x = 0,875\lambda$  по фронтальной стороне и от  $R_x = 0,875\lambda$  до  $R_x = 0$  по тыльной — акустически жесткая, а по периметру располагается акустически мягкое кольцо радиусом от  $R_x = 0,875\lambda$  до  $R_x = 1$ , и наоборот: при акустически мягкой

внутренней части и акустически жесткой периферийной. Как видно, налицо воздействие краевого эффекта. Акустически мягкое кольцо уменьшает аксиальный провал и уровень тыльного лепестка, сравним кривые 1 на рис. 2.36 и 2.37. Добавление жесткого кольца к акустически мягкому экрану приводит к существенному изменению ХН поршня в целом акустически мягком экране. В этом случае расширяется основной лепесток и возникает широкий тыльный с высоким уровнем (см. кривую 2 на рис. 2.37 и кривую 5 на рис. 2.28). Увеличение площади периферийного кольца сопровождается следующими эффектами. В случае акустически жесткой центральной части и мягкого внешнего кольца в аксиальном направлении вновь возникает провал, а относительный уровень лепестков в боковом и тыльном направлениях уменьшается (кривая 3). При акустически мягкой центральной части и жестком периферийном кольце ХН направленности близка к ХН поршня в целом акустически мягком экране (кривая 4). Соотношение площадей с противоположными свойствами материала экрана в данном случае (внутренняя часть/внешняя часть) равно 1,6. Кривая 5 демонстрирует ХН поршня в переменном импедансном экране. Распределение свойств экрана: жесткий, мягкий, в радиальном направлении с шагом  $R_x = 0,125\lambda$ .

#### 2.6.8. Направленность точечного излучателя, расположенного вблизи плоского конечного экрана

Выше рассматривались направленные свойства слабонаправленных односторонних поршневых вибраторов, расположенных заподлицо с поверхностью плоского конечного экрана. На практике нередки случаи, когда слабонаправленный источник располагается на некотором малом расстоянии от экрана. К таким решениям прибегают, либо стремясь видоизменить ХН модели с планарным расположением вибратора и экрана, либо когда к этому вынуждают особенности построения конструкции антенного устройства. В связи с изложенным представляется целесообразным проанализировать изменение направленности в зависимости от смещения источника вдоль оси симметрии круглого экрана. При проведении расчетов использовано выражение (2.9).

Удаление источника сферических волн от поверхности плоского экрана существенно трансформирует ХН. Смещение его на расстояние  $z_0 = 0,25\lambda$  от мягкого экрана расширяет основной лепесток, при этом в случае  $R = 0,5\lambda$  уровень ХН в тыльном полупространстве (ореола) выше, чем при  $z_0 = 0$  (рис. 2.38, кривая 1). С последующим увеличением радиуса экрана вершина основного лепестка уплощается, а ореол уменьшается и ХН приближается к секторной (кривая 2 и 3). Сдвиг источника на расстояние  $z_0 = 0,25\lambda$  от жесткого экрана вызывает резкое расширение основного лепестка при  $R = 0,5\lambda$  (кривая 4), образование трехлепестковой ХН в переднем полупространстве с узким аксиальным и широкими боковыми, на углах  $50-60^\circ$ , максимумами при экране радиусом  $R = \lambda$  и более. Аксиальные тыльные лепестки увеличиваются до значений  $80-100\%$  (кривые 5 и 6). При

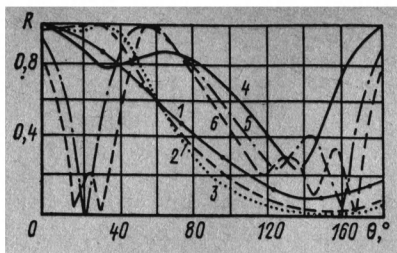


Рис. 2.38. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 0,25\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом: —  $R = 0,5\lambda$ ; - - -  $R = \lambda$ ; - · -  $R = 1,5\lambda$  с удельным локальным импедансом 1, 2, 3 —  $Z = 0$ ; 4, 5, 6 —  $Z = \infty$

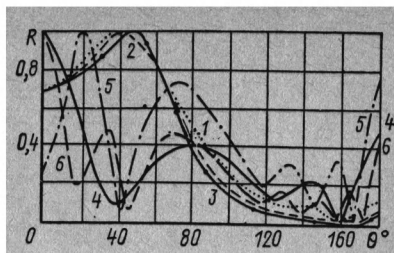


Рис. 2.39. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 0,375\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$  —  $R = 0,5\lambda$ ; - - -  $R = \lambda$ ; - · -  $R = 1,5\lambda$  с удельным локальным импедансом 1, 2, 3 —  $Z = \infty$ ; 4, 5, 6 —  $Z = 0$

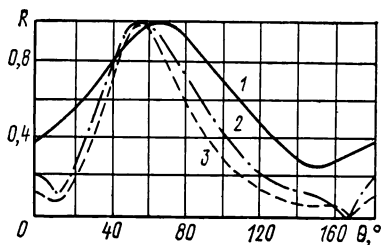


Рис. 2.40. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 0,5\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$  1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = 0$

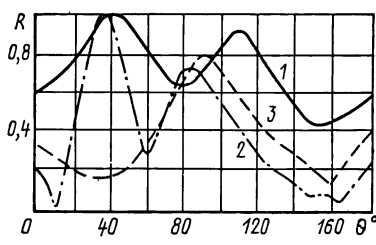


Рис. 2.41. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = \lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$  1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = 0$

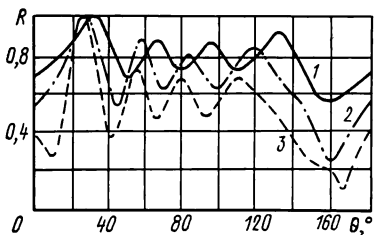


Рис. 2.42. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 2\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$  1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = 0$

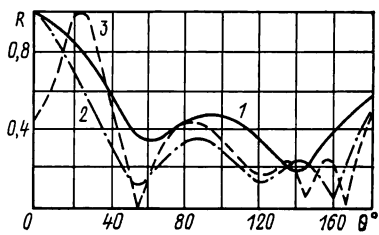


Рис. 2.43. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 0,5\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$  1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = \infty$

смещении источника на расстояние  $z_0 = 0,375\lambda$  от мягкого экрана ХН расширяются. В аксиальном направлении уровень падает до 70 %. Боковые лепестки и ореол с ростом радиуса экрана уменьшаются (рис. 2.39, кривые 1—3): Такое же удаление источника от жесткого экрана при  $R = 0,5\lambda$  вызывает существенную трансформацию ХН с уменьшением радиуса экрана ХН. При этом в аксиальном направлении возможны экстремумы противоположных знаков. Дифракционные лепестки увеличены, тыльные достигают уровней 50—80 % (кривые 4—6). Дальнейшее удаление источника на расстояния  $z_0$ , кратные

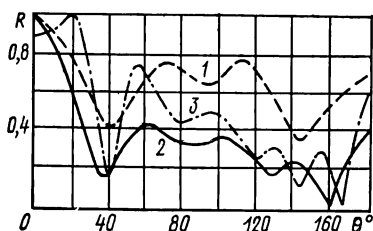


Рис. 2.44. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = \lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$   
 1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = \infty$

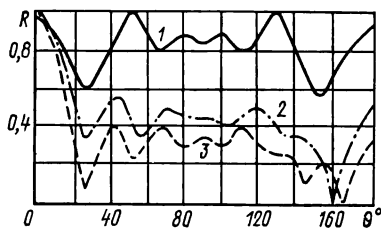


Рис. 2.45. ХН точечного источника, смещенного по оси симметрии на расстояние  $z_0 = 2\lambda$  от плоского конечного экрана радиусом  $R$   
 1 —  $0,5\lambda$ ; 2 —  $\lambda$ ; 3 —  $1,5\lambda$  с удельным импедансом  $Z = \infty$

$\lambda/2$ , от мягкого экрана приводит к формированию воронкообразных характеристик. Основной лепесток становится широким и многоэкстремальным. В его пределах количество симметричных относительно оси максимумов равно  $2 z_0/\lambda$ . Чем больше экран, тем уже максимумы, и меньше дифракционные лепестки (рис. 2.40—2.42). При аналогичных смещениях источника с поверхности жесткого экрана наблюдаются следующие изменения характеристик направленности. Боковые поля увеличены. Просматривается подобие кривых по форме в боковых направлениях. Основной лепесток может иметь максимальный уровень в осевом направлении, принимать П-образную или воронкообразную формы (рис. 2.43—2.45). При экране радиусом  $R = 0,5\lambda$  боковое поле наибольшее, а в случае  $z_0 = 2\lambda$  его уровень приближается к максимальным значениям.

### 2.6.9. Структура бокового поля конечного одностороннего поршня с амплитудным распределением

Для уменьшения влияния шумовых и реверберационных помех возникает необходимость уменьшения уровней боковых лепестков и ореола антенн до 1—3 %. Широкое применение в поисковой технике находят плоские антенны в виде вибраторов поршневого типа. Как известно, они могут быть круглыми, прямоугольными малых и больших волновых размеров с амплитудным распределением и без него.



Задача излучения односторонним круглым поршнем конечных размеров решается точно. Это важно для анализа боковых и дифракционных полей малых уровней, так как при этом исключаются сопоставимые по величине с абсолютным уровнем боковых лепестков ошибки, возможные в случае приближенного решения. Опираясь на точные результаты, полученные для круглого поршня, можно судить и о свойствах прямоугольного вибратора, так как характер изменения

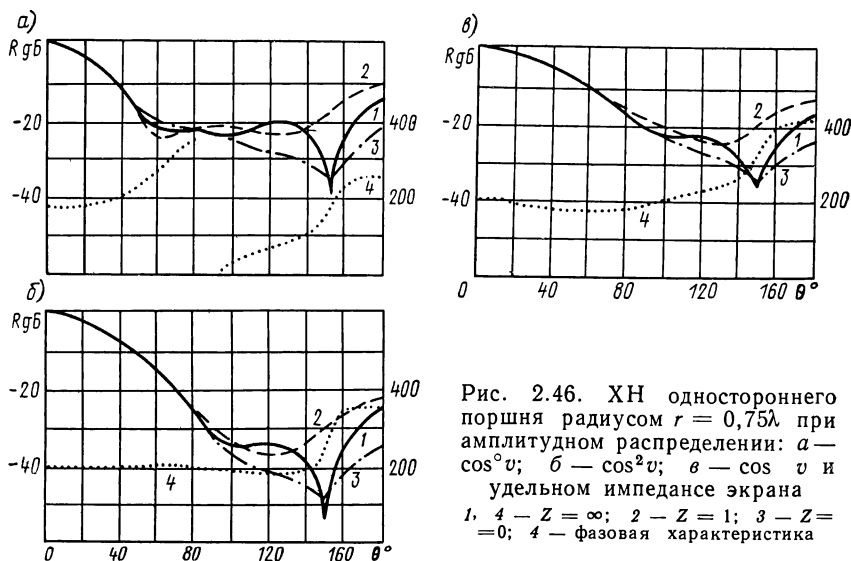


Рис. 2.46. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 0,75\lambda$  при амплитудном распределении: а —  $\cos^2 v$ ; б —  $\cos^2 v$ ; в —  $\cos v$  и удельным импедансе экрана 1, 4 —  $Z = \infty$ ; 2 —  $Z = 1$ ; 3 —  $Z = 0$ ; 4 — фазовая характеристика

его направленности под воздействием аналогичных факторов, как показано выше, подобен. Большинство односторонних вибраторов экранируется с тыльной стороны или заключается в корпус. Следовательно, желательно провести анализ направленности вибраторов с различными волновыми размерами, амплитудными распределениями и импедансными свойствами экранов. Ниже рассмотрены особенности направленных свойств односторонних поршневых вибраторов, экранированных с тыльной стороны экранами, импедансы которых соответственно равны:  $Z = \infty, 1, 0$ . Радиусы вибраторов составляют  $r = R = 0,75\lambda; 2\lambda; 5\lambda$ . В радиальном направлении по поршню вводились спадающие к краям амплитудные распределения, соответствующие следующим функциям:  $\cos^{2n} v = (1 - x^2/F^2)^n$  при  $n = 0, 1$  и  $2$ , где  $v$  — угловая координата в системе сплюснутых сфероидальных координат;  $x$  — текущий радиус поршня;  $F$  — фокусное расстояние сфероида (см. рис. 2.19).

ХН вибратора радиусом  $r = 0,75\lambda$  имеют следующие особенности. При равномерном амплитудном распределении минимальные значения в области основного лепестка составляют — 25 дБ и оказываются у поршня с поглощающим экраном. У поршня с жестким экраном этот уровень равен — 23 дБ, с мягким экраном — 21 дБ. Фазовая характеристика на рис. 2.46 при переходе от основного лепестка к боко-

вому полю меняется плавно, без противофазных скачков и тем меньше ее изменение, чем выше порядок амплитудного распределения. Противофазные переходы возникают только в области образования дифракционного лепестка (см. рис. 2.46, *a*). У всех ХН отсутствуют ярко выраженные боковые лепестки. Четко выраженные экстремумы создаются лишь в области тени, при углах  $140\text{--}180^\circ$ . Рассчитывать ХН направленности поршней такого волнового размера, пользуясь известной формулой  $2\mathcal{J}_1(z)/z$ , можно только в области основного лепестка при уровнях от максимального не менее  $-12$  дБ. При равномерном амплитудном распределении в области углов  $45\text{--}70^\circ$  максимальный уровень создается у ХН поршня с мягким экраном, а минимальный — с поглощающим экраном, при других распределениях уровни ХН в этой области углов от характера импеданса не зависят (см. рис. 2.46, *b*, *в*). Рассмотрим углы от  $75$  до  $180^\circ$ . Здесь при  $\cos^2 v$  уровень бокового поля минимальный в случае с мягким экраном. Влияние жесткого и поглощающего экранов таково, что в направлениях  $110\text{--}130^\circ$  преобладает уровень ХН поршня, экранированного жестким экраном. За пределами  $140^\circ$  наибольший уровень ХН у поршня с поглощающим экраном. Обнаруживается интересная закономерность: уровни бокового и дифракционного полей при увеличении крутизны амплитудного распределения сначала падают (при  $\cos^2 v$ ), а затем растут (при  $\cos^4 v$ ), сравним кривые на рис. 2.46, *a*, *b* и *в*. Это объясняется уменьшением активной площади и увеличением вклада от внешних участков поршня, практически не излучающих энергию и действующих как жесткий экран. Так, при  $\cos^4 v$  отключается практически 40% площади. Как будет показано ниже, при больших волновых размерах вибратора такой эффект не наблюдается. Область размеров поршня радиусом  $r \sim 0,75\lambda$  можно считать переходной: уже при радиусе  $r \sim \lambda$  оказывается справедливой теория с применением функций  $2\mathcal{J}_1(z)/z$ .

Проанализируем теперь ХН вибраторов больших волновых размеров:  $r = 2\lambda$  и  $5\lambda$ . На рис. 2.47 и 2.48 показаны ХН вибраторов с жесткими экранами и разными амплитудными распределениями:  $\cos^0 v$ ,  $\cos^2 v$  и  $\cos^4 v$ . Из рассмотрения кривых можно сделать следующие выводы. ХН имеют четко выраженные боковые и дифракционные лепестки. Части характеристики направленности в пределах от  $0$  до  $90^\circ$  не зависят от характера импеданса экрана и подчиняются зависимостям, описываемым функцией  $2\mathcal{J}_1(z)/z$ . Основные лепестки расширяются, а боковые расширяются и уменьшаются с увеличением порядка амплитудного распределения. Можно видеть, что число лепестков, включая основной, при равномерном амплитудном распределении в переднем полупространстве равно числу полуволн, укладываемых на диаметре поршня, за вычетом единицы. Их количество в переднем полупространстве уменьшается, и они сдвигаются к углам  $90^\circ$  с увеличением порядка амплитудного распределения. Эту часть характеристики направленности можно назвать интерференционной. За пределами  $90^\circ$  характеристика направленности приобретает дифракционный характер. И эту ее часть можно именовать дифракционной.

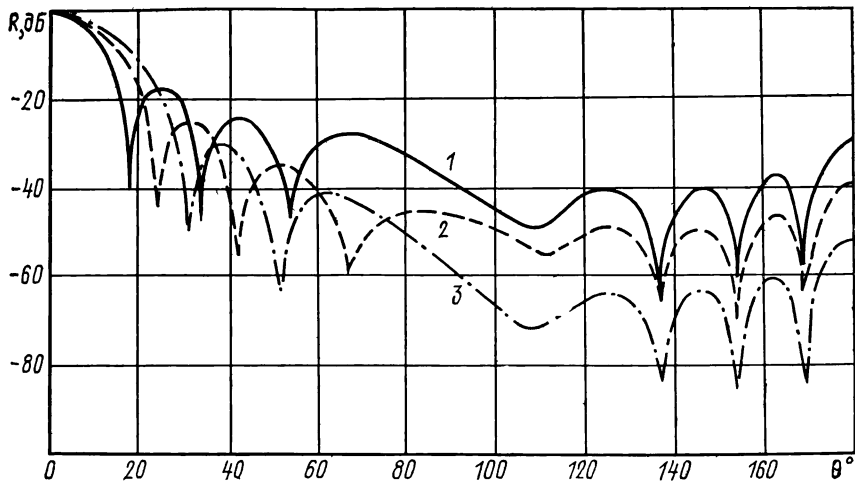


Рис. 2.47. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 2\lambda$  при амплитудном распределении и удельном импедансе экрана  $Z = \infty$   
 1 —  $\cos^2 v$ ; 2 —  $\cos^2 v$ ; 3 —  $\cos^4 v$

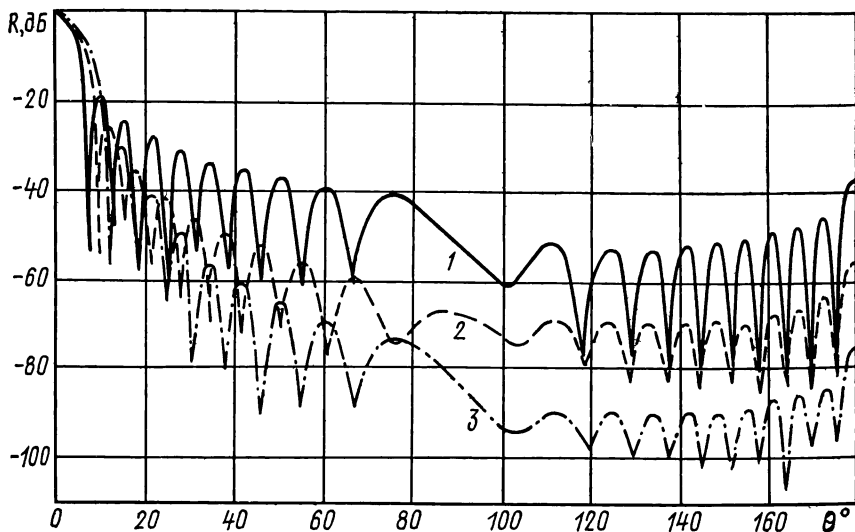


Рис. 2.48. ХН одностороннего поршня радиусом  $r = 5\lambda$  при амплитудном распределении и удельном импедансе экрана  $Z = \infty$   
 1 —  $\cos^2 v$ ; 2 —  $\cos^2 v$ ; 3 —  $\cos^4 v$

Вид дифракционной характеристики существенно зависит от характера импеданса экрана. Количество дифракционных лепестков определяется волновым размером вибратора и не зависит от порядка амплитудного распределения. При жестком экране в тыльном полупространстве четко прорисовываются противофазные дифракцион-

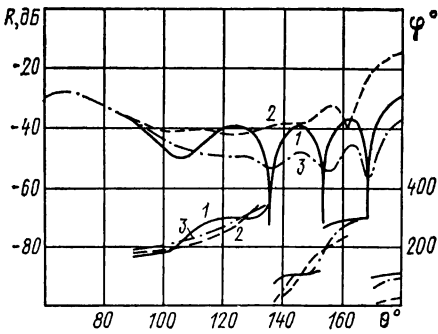


Рис. 2.49. Дифракционные части амплитудных и фазовых ХН одно-стороннего поршня радиусом  $r = 2\lambda$  при амплитудном распределении  $\cos^0 \nu$  и удельном импедансе экрана  $Z$   
 1 —  $\infty$ ; 2 — 1; 3 — 0

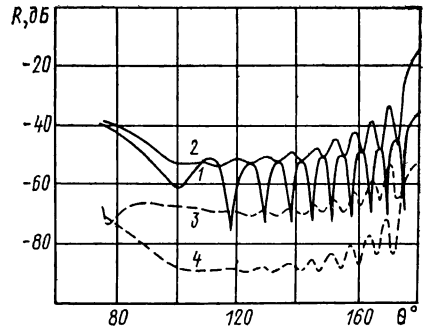


Рис. 2.50. Дифракционные части ХН одно-стороннего поршня радиусом  $r = 5\lambda$  при амплитудном распределении и удельном импедансе  
 1 —  $\cos^0 \nu$ ,  $Z = \infty$ ; 2 —  $\cos^2 \nu$ ; 3 —  $\cos^4 \nu$ ; 4 —  $\cos^6 \nu$ ,  $Z = 1$

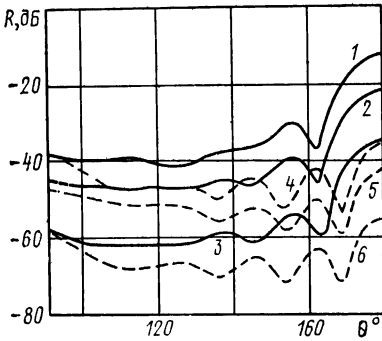


Рис. 2.51. Дифракционные части ХН одно-стороннего поршня радиусом  $r = 2\lambda$  при амплитудном распределении  
 1, 4 —  $\cos^0 \nu$ ; 2, 5 —  $\cos^2 \nu$ ; 3, 6 —  $\cos^4 \nu$ ; — — —  $Z = 0$ ; — — — —  $Z = 1$

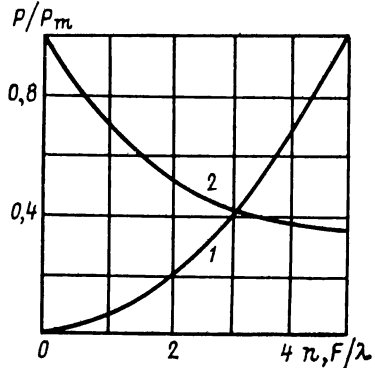


Рис. 2.52. Зависимости развиваемого в дальней зоне нормированного давления от волновых размеров одно-стороннего поршня 1 и амплитудного распределения вида  $\cos^4 \nu$  по его поверхности 2

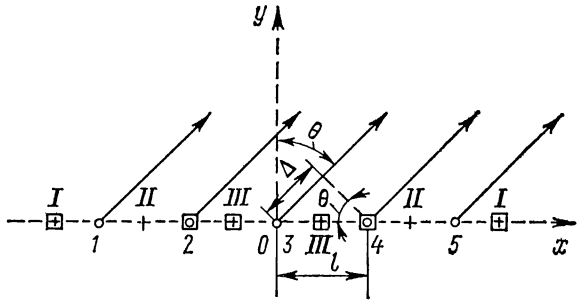
ные лепестки. Число их равно числу интерференционных лепестков (в переднем полупространстве) характеристики поршня с равномерным амплитудным распределением. Мягкий экран уменьшает общий уровень дифрагированного поля, а поглощающий увеличивает по сравнению с жестким (рис. 2.49). Четкость прорисовки лепестков при мягком и особенно при поглощающем экранах уменьшается. Увеличение волнового размера вибратора приводит к росту числа дифракционных лепестков, и в направлении от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  ширина их уменьшается, а уровень растет. Во всех случаях повышение порядка амплитудного распределения уменьшает уровень дифракционного поля без изменения мест положения лепестков (рис. 2.50, 2.51, 2.52).

## § 2.7. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ АНТЕННЫ

### 2.7.1. Прямолинейные дискретные антенны

Рассмотрим сначала основные закономерности процесса формирования характеристики направленности дискретной плоской антенной на примере линейной антенны, составленной из точечных ненаправленных преобразователей (рис. 2.53). Предположим вначале, что возбуждение преобразователей вдоль оси  $x$  синфазное и с одинаковыми амплитудами. Разность хода лучей  $\Delta$  и направление  $\theta$  связаны зависимостью  $\Delta = l \sin \theta$ .

Рис. 2.53. К пояснению процесса формирования ХН дискретной плоской антенной



**Распределение максимумов.** Максимум основного лепестка ориентируется по направлению  $\theta = 0^\circ$ . Если при изменении  $\theta$  разность хода принимает значения, кратные  $\lambda$ ,  $l \sin \theta = \lambda i$ , где  $i = 1, 2, 3 \dots$ , то вследствие синфазного сложения колебаний в соответствующих таким значениям  $\Delta$  направлениях  $\theta$  возникают боковые лепестки, равные по уровню основному. При изменении  $\theta$  от 0 до  $\pm 90^\circ$  число стопроцентных боковых лепестков в переднем полупространстве определяется отношением  $l/\lambda$ , т. е. зависит только от расстояния между центрами преобразователей и длины волны.

**Распределение минимумов.** При отклонении лучей от нулевого направления находятся такие направления, при которых происходит противофазное сложение колебаний, амплитуда поля уменьшается до нуля, в ХН образуются нулевые уровни.

Условия возникновения минимумов:

$$\Delta = \lambda i/n, \quad (2.10)$$

где  $n$  — число преобразователей в антенне;  $i = 1, 2, 3, \dots$  за исключением значений, соответствующих случаю, когда  $n$  кратно  $i$ . Число минимумов равно целому числу  $n-1$ .

**Распределение боковых лепестков.** Из (2.10) ясно, что между двумя лепестками со стопроцентным уровнем располагается  $n-1$  минимумов, следовательно, между этими лепестками должно укладываться  $n-2$  боковых лепестка, уровень которых меньше 100 %.

**Направление максимумов и минимумов.** Направление максимумов стопроцентных боковых лепестков находится из уравнения  $\sin \theta = \pm \lambda i/l$ ,  $i = 1, 2, 3 \dots$ ; направления минимумов — из уравнения  $\sin \theta = \pm \lambda i/n$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ , кроме кратных  $n$ ).

С достаточной степенью точности можно считать, что малые боковые лепестки располагаются примерно посредине между минимумами в соответствии с равенством  $\sin \theta_0 = [(2i + 1)/2] (\lambda/nl)$ . Знак «плюс» относится к правым экстремумам, а «минус» — к левым по отношению к основному лепестку.

*Уравнение характеристики направленности.* ХН антенны, состоящей из точечных элементов с равномерным амплитудным и синфазным распределением определяется следующим выражением:  $R(\theta) = (1/n) \sum_{i=1}^n e^{-jk\Delta i}$ , где  $n$  — число преобразователей в антенне, величиной  $1/r$  для дальней зоны Фраунгофера как постоянной можно пренебречь.

Для эквидистантной линейной антенны

$$\sum_{i=1}^n e^{-jk\Delta i} = 1 + e^{-jkl \sin \theta} + e^{-j2kl \sin \theta} + \dots + e^{-j(n-1)kl \sin \theta}.$$

Переход к модулю дает хорошо известную формулу, определяющую нормированную к 1 при нулевом направлении ХН линейной антенны из точечных элементов

$$R(\theta) = \sin [n (\pi l / \lambda) \sin \theta] / n \sin [(\pi l / \lambda) \sin \theta].$$

*Уровни боковых лепестков, располагающихся в промежутках между стопроцентными лепестками.* Уровни промежуточных боковых лепестков (табл. 2.3) могут быть найдены с помощью уравнения  $R = 1/\{n \sin [(2i + 1)/2n] \pi\}$ . Уравнение справедливо при  $l/\lambda > 0,5$ .

Из табл. 2.3 видно, что уровень всех промежуточных боковых лепестков с увеличением текущего угла  $\theta$  в направлении от основного к стопроцентному боковому лепестку сначала уменьшается, а при достижении значения  $\theta$ , равного половине углового отстояния стопроцентного лепестка, снова растет по тому же закону. Уровни всех промежуточных боковых лепестков уменьшаются с ростом числа элементов, составляющих антенну, и в пределе стремятся к уровням боковых лепестков сплошной линейной антенны.

Таблица 2.3 Уровни промежуточных боковых лепестков, %

$n$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	$\sigma_6$	$\sigma_7$	$\sigma_8$	$\sigma_9$	$\sigma_{10}$
3	33,3									
4	27,1	27,1								
5	24,7	20,0	24,7							
6	23,6	17,2	17,2	23,6						
7	23,0	15,9	14,3	15,9	23,0					
8	22,5	15,0	12,7	12,7	15,0	22,5				
9	22,2	14,5	11,8	11,1	11,8	14,5	22,2			
10	22,0	14,2	11,2	10,1	10,1	11,2	14,2	22,0		
11	21,9	13,9	10,8	9,5	4,6	9,5	10,8	13,9	21,9	
12	21,8	13,7	10,5	9,0	4,8	4,2	9	10,5	13,7	21,8

Условие отсутствия стопроцентных боковых лепестков. Боковые лепестки, равные по уровню основному, не будут входить в область действительных углов  $\theta = \pm 90^\circ$  (переднее полупространство) даже частично, если выполняется условие  $l/\lambda \leq (n-1)/n$ .

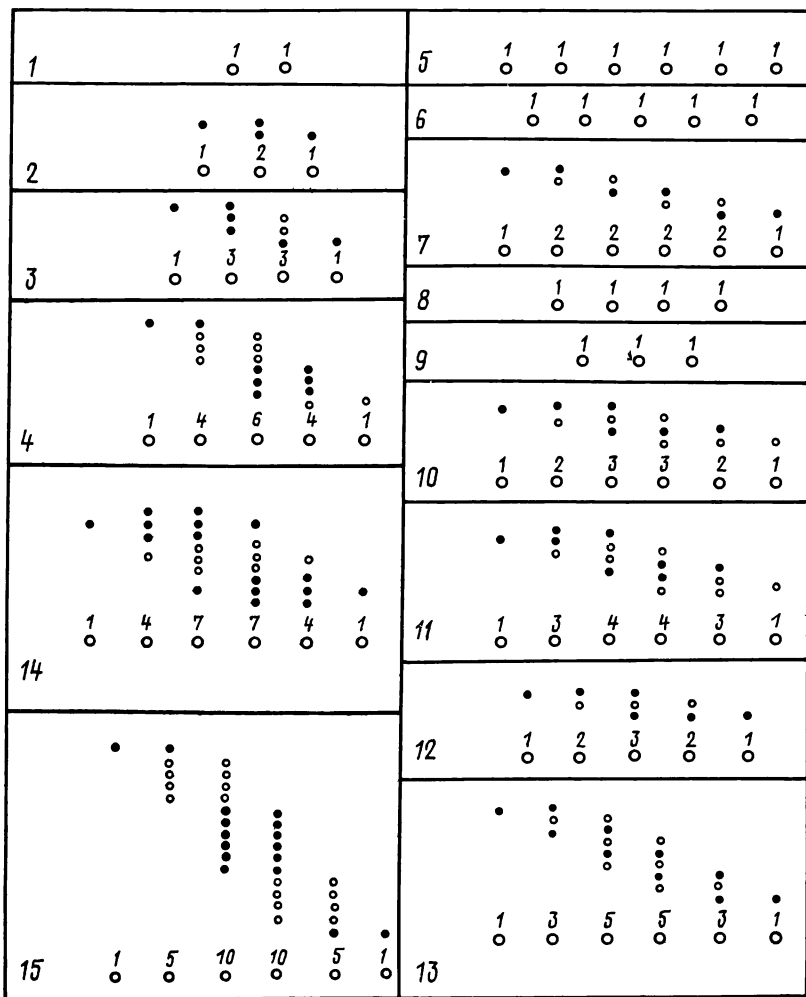


Рис. 2.54. К пояснению формирования ХН многоэлементных антенн с амплитудным распределением

● ○ — обозначение группы секций, составляющих антенну

### 2.7.2. Антенны из точечных элементов с амплитудным распределением

В ряде случаев находят применение антенны с изменяющимся распределением амплитуды возбуждения элементов. Нормированная к нулевому направлению характеристика направленности такой ан-

тенны в общем виде определяется выражением

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-jk\Delta_i} / \sum_{i=1}^n A_i,$$

где  $A_i$  — амплитуда возбуждения элемента, являющаяся функцией от его номера. Используя теорему умножения, в некоторых случаях можно упростить это выражение. Обратимся к рис. 2.54. ХН антенны

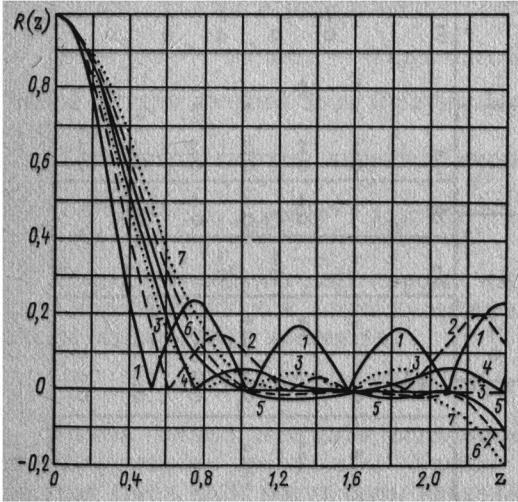


Рис. 2.55. Абсолютные значения функций, характеризующих направленность линейных шестизлементных антенн с амплитудными распределениями от аргумента  $z = \pi (l/\lambda) \sin \theta$

1 —  $R(1, 1, 1, 1, 1, 1) = \sin 6z/6 \sin z$ ; 2 —  $R(1, 2, 2, 2, 2, 1) = (\sin 5z/5 \sin z) \cos z$ ; 3 —  $R(1, 2, 3, 3, 2, 1) = (\sin 4z \sin 3z)/12 \sin^2 z$ ; 4 —  $R(1, 3, 4, 4, 3, 1) = (\sin 4z/4 \sin z) \cos^2 z$ ; 5 —  $R(1, 3, 5, 5, 3, 1) = (\sin 3z/3 \sin z) \cos z$ ; 6 —  $R(1, 4, 7, 7, 4, 1) = (\sin 3z/3 \sin z) \cos^2 z$ ; 7 —  $R(1, 5, 10, 10, 5, 1) = \cos^2 z$

$I$  из двух элементов с одинаковым возбуждением определяется выражением  $R(1, 1) = \sin(2z)/2 \sin z = \cos z$ , где  $z = (\pi l/\lambda) \sin \theta$ , а цифры в скобках при  $R$  означают относительные амплитуды возбуждения элементов.

Если заменить каждый элемент антенны  $I$  группой, представляющей ту же самую антенну  $I$ , полагая что центры новых антенн совпадают с местами расположения элементов первоначальной антенны, получим новую антенну  $2$ , состоящую из трех элементов. Центральный элемент приобретает удвоенную амплитуду возбуждения. Выражение, определяющее ХН антенны  $2$ , в соответствии с теоремой умножения, примет вид

$$R(1, 1) R(1, 1) = R^2(1, 1) = R(1, 2, 1) = (\sin 2z)^2 / (2 \sin z)^2 = \cos^2 z.$$

Если теперь продолжить замену, получим антенну  $3$

$$R(1, 1) R(1, 1) R(1, 1) = R(1, 2, 1) R(1, 1) = R^3(1, 1) = \\ = R(1, 3, 3, 1) = \cos^3 z.$$

Аналогично для антенны  $4$

$$R(1, 3, 3, 1) R(1, 1) = R^4(1, 1) = R(1, 4, 6, 4, 1) = \cos^4 z$$

и так далее.

Естественно, возможны и другие комбинации. Примеры некоторых из них приведены в табл. 2.4.



Таблица 2.4. Выражения для ХН плоских решеток с амплитудным распределением

Вид антенны по рис. 2.54	Вид замены элементов антенны	Вид символов характеристики направленности при замене	Символ характеристики направленности	Функция характеристики направленности
7	6 группой 1	$R(1, 1, 1, 1, 1)$	$R(1, 2, 2, 2, 2, 1)$	$\frac{\sin 5z}{5 \sin z} \cdot \frac{\sin 2z}{2 \sin z}$
10	8 группой 9	$R(1, 1, 1, 1)$	$R(1, 2, 3, 3, 2, 1)$	$\frac{\sin 4z}{4 \sin z} \cdot \frac{\sin 3z}{3 \sin z}$
11	8 группой 2	$R(1, 1, 1, 1) \overbrace{R(1, 2, 1)}^{\uparrow}$	$R(1, 3, 4, 4, 3, 1)$	$\frac{\sin 4z}{4 \sin z} \cdot \left( \frac{\sin 2z}{2 \sin z} \right)^2$
12	9 группой 9	$R(1, 1, 1) R(1, 1, 1)$	$R(1, 2, 3, 2, 1) = R^2(1, 1, 1)$	$\left( \frac{\sin 3z}{3 \sin z} \right)^2$
13	1 группой 12	$R(1, 1) \overbrace{R(1, 2, 3, 2, 1)}^{\uparrow}$	$R(1, 3, 5, 5, 3, 1)$	$\frac{\sin 2z}{2 \sin z} \left( \frac{\sin 3z}{3 \sin z} \right)^3$
14	9 группой 3	$R(1, 1, 1) R(1, 3, 3, 1); R^3(1, 1)$	$R(1, 4, 7, 7, 4, 1)$	$\frac{\sin 3z}{3 \sin z} \left( \frac{\sin 2z}{2 \sin z} \right)^3$
15	4 группой 1	$R(1, 4, 6, 4, 1) \overbrace{R(1, 1)}^{\uparrow}; R^4(1, 1)$	$R(1, 5, 10, 10, 5, 1)$	$\left( \frac{\sin 2z}{2 \sin z} \right)^5$

Аналогичным образом можно получить выражения, определяющие ХН антенн с другим числом элементов и амплитудными распределениями. На рис. 2.55 представлены графики функций в зависимости от аргумента  $(\pi l/\lambda) \sin \theta$ , иллюстрирующие видоизменение ХН шестиеlementной антенны при введении различных амплитудных распределений. (Боковые лепестки кривых 5, 6 и 7 проведены ниже оси абсцисс для наглядности графиков.)

### 2.7.3. Упрощенные выражения, определяющие ХН линейных антенн, в случаях их симметрии относительно центра

Предположим, что антенна симметрична относительно начала координат «0» (см. рис. 2.53) по отстоянию элементов и их возбуждению. Разности хода  $\Delta_i$  для элементов антенны можно записать в следующем виде:  $\Delta_4 = x_4 \sin \theta = l \sin \theta$ ;  $\Delta_2 = -x_2 \sin \theta = -l \sin \theta$ ;  $\Delta_5 = x_5 \sin \theta = 2l \sin \theta$ ;  $\Delta_1 = -x_1 \sin \theta = -2l \sin \theta$ ;  $\Delta_3 = 0 \sin \theta = 0$ .

ХН пятиэлементной антенны представляется экспоненциальным рядом вида:  $1/ne^{-jk\Delta_1} + e^{-jk\Delta_2} + e^{-jk\Delta_3} + e^{-jk\Delta_4} + e^{-jk\Delta_5}$ , который с помощью формулы Эйлера:  $e^{\pm jkz} = \cos z \pm j \sin z$  может быть преобразован в тригонометрический ряд:  $1/n [\cos k\Delta_1 - j \sin k\Delta_1 + \cos k\Delta_2 - j \sin k\Delta_2 + \cos k\Delta_3 - j \sin k\Delta_3 + \cos k\Delta_4 - j \sin k\Delta_4 + \cos k\Delta_5 - j \sin k\Delta_5]$ . После подстановки значений  $\Delta$  получается следующее выражение:  $1/n [\cos (-2kl \sin \theta) - j \sin (-2kl \sin \theta) + \cos (-kl \sin \theta) - j \sin (-kl \sin \theta) + \cos (0) - j \sin (0) + \cos (kl \sin \theta) - j \sin (kl \sin \theta) + \cos (2kl \sin \theta) - j \sin (2kl \sin \theta)]$ .

Вследствие того, что косинус — функция четная, а синус — нечетная, после приведения подобных членов получаем  $1/5 [1 + 2 \cos (kl \sin \theta) + 2 \cos (2kl \sin \theta)]$ .

Таким же образом может быть получена формула ХН антенны из четного числа элементов (см. обозначение элементов крестиками на рис. 2.53):  $2/6 \cos [(kl/2) \sin \theta] + \cos [(3kl/2) \sin \theta] + \cos [(kl/2) \sin \theta]$ , а также антенны с неравномерным расположением элементов (см. обозначения прямоугольниками на рис. 2.53):  $2/6 \{ \cos [(kl/2) \times \sin \theta] + \cos (kl \sin \theta) + \cos [(5kl/2) \sin \theta] \}$  и антенны с переменной амплитудой возбуждения элементов (см. римские цифры, характеризующие относительное амплитудное распределение, по элементам, обозначенным крестиками на рис. 2.53):  $2/12 \{ 3 \cos [(kl/2) \sin \theta] + 2 \cos [(3kl/2) \sin \theta] + \cos [(5kl/2) \sin \theta] \}$ .

В общем виде функции ХН, симметричных относительно центра линейных антенн, приведены в табл. 2.5.

### 2.7.4. Антенны из точечных элементов с фазовым распределением

В гидроакустике находят широкое применение плоские антенны с искусственными или компенсированными характеристиками направленности.

Фазовое распределение по элементам антенны вводится таким образом, чтобы колебания складывались с одинаковой фазой не в на-

Таблица 2.5. Характеристики направленности линейных антенн

Число элементов	Закон амплитудного распределения	Закон расположения элементов	Функция характеристики направленности
Нечетное	Равномерный	Эквидистантный	$\left[ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos (ikl \sin \theta) \right] n^{-1}$
Четное	Равномерный	Эквидистантный	$2 \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} \cos \left[ k(2i+1) \frac{l}{2} \sin \theta \right] n^{-1}$
Нечетное	Равномерный	$f(i)$	$\left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos [ikf(i)l \sin \theta] \right\} n^{-1}$
Четное	Равномерный	$f(i)$	$2 \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} \cos \left[ ikf(i) \frac{l}{2} \sin \theta \right] n^{-1}$
Нечетное	$A(i)$	Эквидистантный	$\left\{ A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} A(i) \cos [ikl \sin \theta] \right\} n^{-1}$
Четное	$A(i)$	Эквидистантный	$\sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} A(i) \cos \left[ k(2i+1) \frac{l}{2} \sin \theta \right] \times$ $\times \left[ \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} A(i) \right]^{-1}$
Нечетное	$A(i)$	$f(i)$	$\left\{ A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} A(i) \cos [ikf(i)l \sin \theta] \right\} \times$ $\times \left[ A_0 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} A_i \right]^{-1}$
Четное	$A(i)$	$f(i)$	$\sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} A(i) \cos \left[ ikf(i) \frac{l}{2} \sin \theta \right] \times$ $\times \left[ \sum_{i=0}^{\frac{n}{2}-1} A(i) \right]^{-1}$

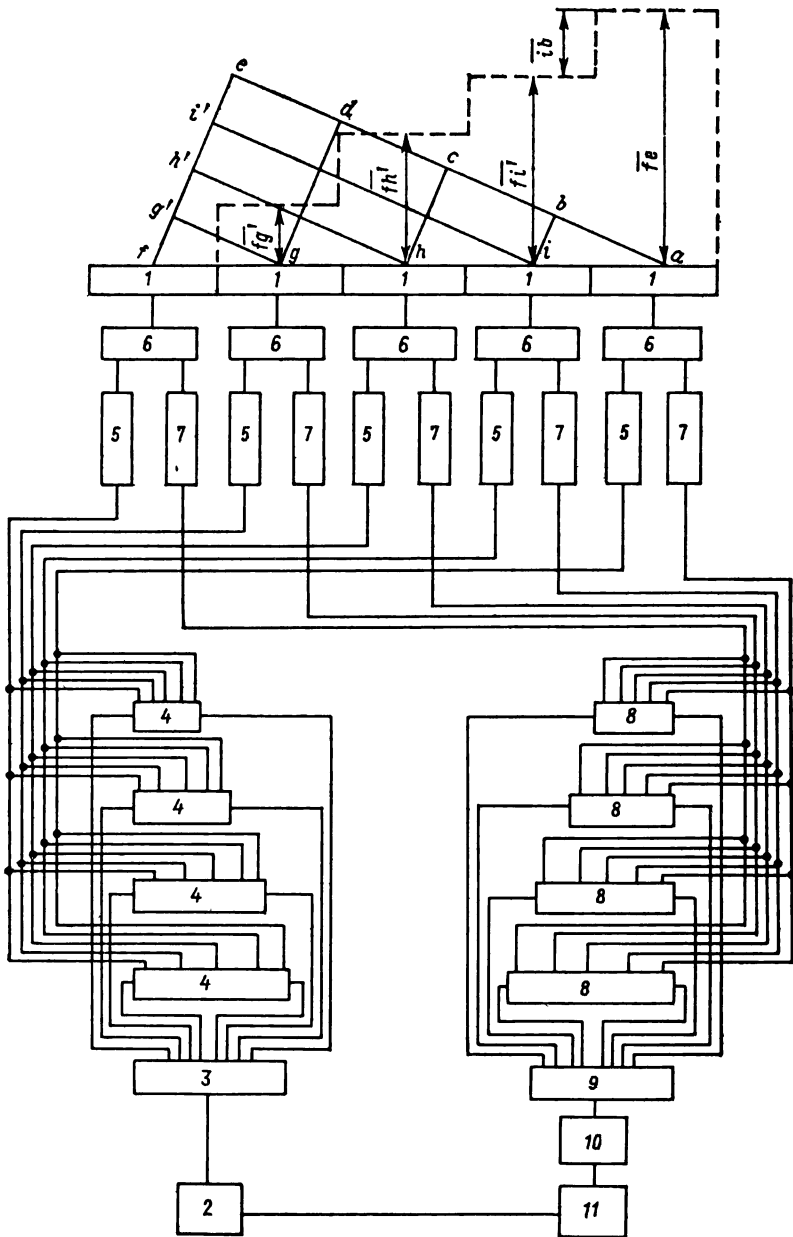


Рис. 2.56. Функциональная схема станции с дискретной плоской антенной и временной компенсацией

1 — секции (преобразователи) антенны; 2 — генератор; 3 — коммутатор направления; 4 — линии задержки передающего тракта; 5 — усилители мощности; 6 — коммутатор приема — передачи; 7 — предварительные усилители; 8 — линии задержки приемного тракта; 9 — коммутатор направления; 10 — основной усилитель; 11 — индикатор с синхронизатором

правлении  $\theta = 0^\circ$ , а в заданном направлении  $\beta$ , называемом направлением компенсации. По этому направлению ориентируется максимум основного лепестка.

Для получения волны с плоским фронтом в заданном направлении необходимо в цепь элемента  $a$  ввести электрическую задержку  $f\bar{e}$ , равную времени прохождения звуком расстояния  $fe$  (рис. 2.56). В цепях элементов  $i$ ,  $h$ ,  $g$  задержки должны уменьшаться на величины, соответствующие времени прохождения звуком расстояний:  $ib$ ,  $hc$ ,  $gd$ , а в цепи элемента  $f$  задержки быть не должно.

Компенсация, выполненная таким образом, называется временной и обеспечивает постоянство угла поворота ХН на любой частоте. Иногда применяется фазовая компенсация (в цепи элементов включаются фазовращатели) — изменение непосредственно фаз возбуждения элементов антенны по заданному (в частности, линейному) закону. Необходимые значения фаз по элементам могут быть найдены, если вычесть из путей (проходимых звуком от элементов антенны до линии  $ae$ ), представленных в волновом измерении, целое число длин волн, а оставшиеся доли волн перевести в градусное или радианное измерение (длина волны соответствует  $360^\circ$  или  $2\pi$ ). Чтобы сохранить угол поворота ХН постоянным, фазовые распределения следует менять с изменением частоты.

Угол поворота ХН при временной и фазовой компенсациях связан со скоростью звука в воде и может меняться в некоторых пределах в зависимости от температуры и солености воды (см. рис. 2.1).

Для изменения угла поворота ХН требуется изменение характера компенсации. Таким образом, сколько необходимо иметь направлений характеристики направленности, столько требуется и различных временных задержек в цепи каждого элемента антенны или положений каждого фазовращателя. Чем меньше дискрет фазы и протяженность по антенне участка с постоянной фазой или задержкой, тем ближе форма повернутой ХН к той, которую она имеет при  $\beta = 0^\circ$ .

На рис. 2.56 показана примерная схема станции с линейной антенной.

Дискретное изменение задержки или фазы на каждом элементе во времени вызывает шаговый поворот ХН, а быстрая электронная коммутация направлений образует статический веер ХН. Для плавного поворота — сканирования ХН — необходимо непрерывное изменение фазы на каждом элементе антенны во времени, например с помощью фазовращателей. Плавное изменение направления ХН может быть получено также, если элементы антенны возбуждать на разных изменяющихся линейно вдоль антенны в небольших пределах частотах. Поскольку частота есть не что иное, как изменение фазы возбуждающего напряжения во времени, по элементам антенны образуется периодически повторяющееся фазовое распределение, обуславливающее сканирование ХН.

При построении станции с дискретной антенной и электронным управлением ХН возникает противоречие между стремлением разделить антенну на возможно большее число секций (для уменьшения

дискрета фазы) и уменьшить до предела число электрических каналов станций (с целью ее упрощения).

**Уравнение характеристики направленности.** Нормированная к максимальному значению ХН линейной антенны с компенсацией определяется формулой

$$R(\theta) = \frac{\sin [n (\pi l / \lambda) (\sin \theta - \sin \beta)]}{n \sin [(\pi l / \lambda) (\sin \theta - \sin \beta)]},$$

где  $l \sin \beta$  — компенсируемая разность хода.

**Направления максимумов и минимумов.** При нахождении максимумов и минимумов в формулах, полученных для линейной антенны без компенсации, необходимо заменить разность хода  $\Delta$  на  $\Delta - \Delta_\beta$ . Таким образом, направления стопроцентных боковых лепестков определяются из условия  $l (\sin \beta_{6i} - \sin \beta) = \pm \lambda i$ , или  $\sin \beta_{6i} = \sin \beta \pm (\lambda/l) i$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots$

На рис. 2.57 верхние кривые относятся к боковым лепесткам, расположенным со стороны направления поворота основного лепестка, нижние — с противоположной стороны. Цифры при кривых означают волновые расстояния между фазовыми центрами элементов антенны, вверху справа через  $i$  обозначены порядковые номера боковых лепестков.

Углы ориентации минимумов ХН могут быть найдены из равенства:  $\Delta - \Delta_\beta = \pm (\lambda/n) i$ , или  $\sin \theta_{mi} = \sin \beta \pm (\lambda/nl) i$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots$ , кроме  $n$ , кратных  $i$ .

**Пример 2.1.** Определить параметры характеристики направленности линейной антенны, состоящей из  $n = 8$  точечных излучателей (приемников), расположенных с шагом  $l = 0,5 \lambda$ , без выполнения расчета значений характеристики по текущим углам  $\theta$ . Пользуясь формулой  $\sin \theta = \pm \lambda i/n$ , находим направления минимумов (табл. 2.6). По формуле  $\sin \theta_m^\sigma = [(2i + 1)/2] (\lambda/l n)$  определяем приближенные направления  $\theta_m^\sigma$  боковых лепестков (табл. 2.7). Определяем уровни боковых лепестков  $R(\theta) = 1/\sin [(2i + 1/2) \pi]$  (табл. 2.8).

Таблица 2.6. Направления минимумов ХН

$i$	1	2	3	4
$\sin \theta_m$	0,25	0,5	0,75	1
$\theta_m^\circ$	14,4	30	48,6	90

Ширину основного лепестка на уровне 0,7 находим, решая трансцендентное уравнение  $\sin [n (\pi l / \lambda) \sin \theta] = 0,7 n \sin (\pi l / \lambda \sin \theta)$ . Нам необходимо задать значения  $\theta$ . Для этого можно воспользоваться табл. 2.1 для определения ширины основного лепестка сплошной линейной антенны, с целью ориентировочной оценки ширины. Полагаем размер сплошной антенны  $D = 0,5 \lambda \cdot 7 = 3,5 \lambda$ , ( $7$  — число промежутков между излучателями).  $\Delta \theta_{спл}^\circ = 50,5 \lambda/D = 50,5/3,5 = 14,43^\circ$  (табл. 2.9). Полуширина основного лепестка составляет  $7,21^\circ$ . Выбираем значения  $\theta$  в пределах от 5 до  $8^\circ$ .

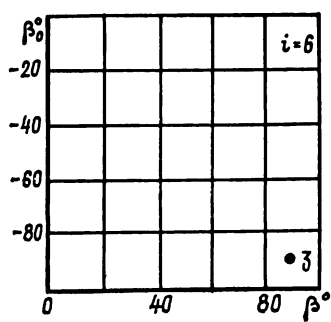
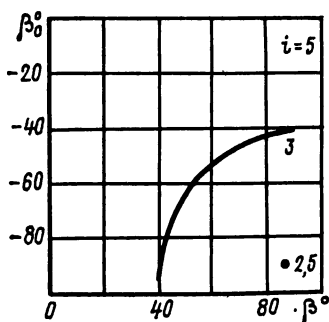
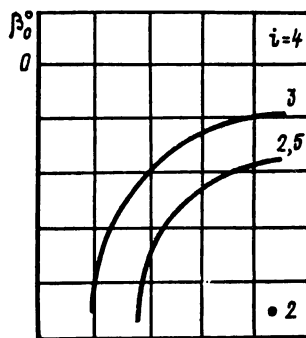
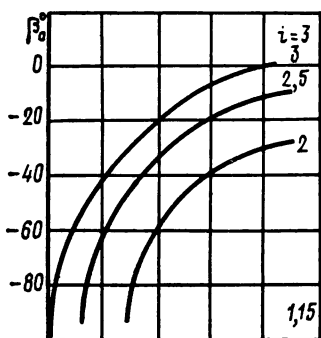
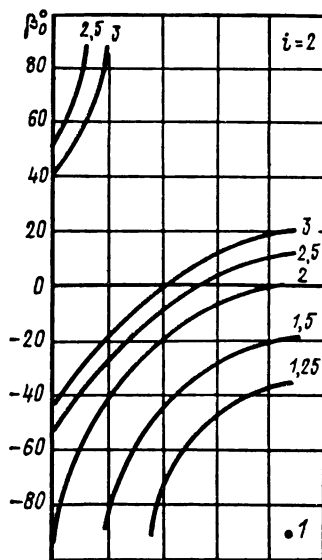
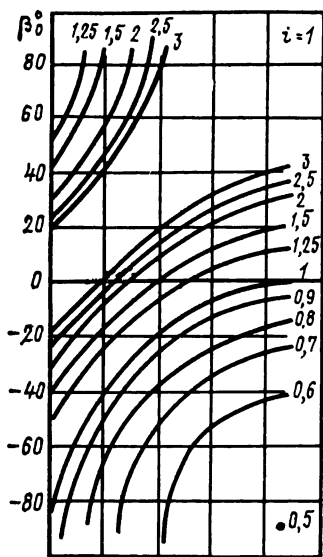


Рис. 2.57. Зависимость углов поворота максимальных боковых лепестков от углов поворота основного лепестка ХН линейной дискретной антенны

Таблица 2.7. Направления боковых лепестков ХН

$i$	1	2	3
$\frac{2i+1}{2}$	1,5	2,5	3,5
$\sin \theta_0$	0,375	0,625	0,875
$\theta_0$	22	38,7	61

Таблица 2.8. Уровни боковых лепестков ХН

$i$	1	2	3
$\left[ \frac{2i+1}{2} \pi \right]$	0,589	0,982	1,374
$R(\theta)$	0,225	0,15	0,127

Таблица 2.9. К решению трансцендентного уравнения

$\theta^\circ$	5	6	7	8
$\sin \left( \pi \frac{l}{\lambda} \sin \theta \right)$	0,136	0,164	0,19	0,216
$5,6 \sin \left( \pi \frac{l}{\lambda} \sin \theta \right)$	0,762	0,918	1,06	1,21
$\sin \left( n \frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta \right)$	0,888	0,968	0,999	0,985

Строим графики функций. Точка пересечения кривых 1 и 2 (рис. 2.58) определяет полуширину основного лепестка дискретной антенны. Таким образом,  $\Delta\theta_{\text{диск}} = 12,8^\circ$ .

**Пример 2.2.** Определить число, направления и ширину по нулевым уровням стопроцентных максимумов характеристики направленности антенны из



$n = 8$  точечных излучателей (приемников), расположенных по прямой линии с шагом  $l = 3\lambda$ .

Определяем число стопроцентных максимумов,  $\arcsin \theta_{100\%} = \pm \lambda i / l$ , (табл. 2.10).

У ХН имеются: основной лепесток, ориентированный по направлению  $\theta = 0^\circ$  — по нормали к линии расположения источников, и 6 стопроцентных, расположенных симметрично по отношению к основному — по три с каждой стороны. Определим ширину каждого стопроцентного лепестка по нулевому уровню,  $\arcsin \theta_m = \pm \lambda i / n$ .

Первый минимум находится при  $i = 1$ . Направления максимумов стопроцентных лепестков определяются значениями  $i = 8, 16, 24$ , кратными 12. Следовательно, направления минимумов первого стопроцентного лепестка определяются значениями  $i = 7$  и 9, второго — значениями  $i = 15$  и 17 и третьего — значениями  $i = 23$

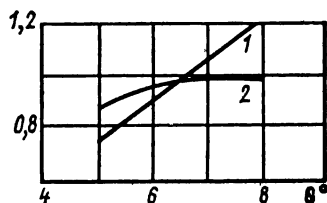


Рис. 2.58. К решению трансцендентного уравнения для определения угла раствора основного лепестка ХН линейной антенны

и 25 (табл. 2.11). Таким образом, ширина лепестков по нулевым уровням определяется следующим образом;  $\Delta\theta_0 = 2,38 \cdot 2 = 4,76^\circ$ ;  $\Delta\theta_1 = 22 - 16,95 = 5,05^\circ$ ;  $\Delta\theta_2 = 44,99 - 38,68 = 6,31^\circ$ . У третьего лепестка по нулевым уровням можно найти только полуширину части лепестка, обращенной в сторону основного, так как с противоположной стороны нулевой уровень этого лепестка отсутствует (часть лепестка в переднем полупространстве, не пересекая нулевой уровень, переходит в часть лепестка, лежащую в тыльном полупространстве). Итак,  $\Delta\theta_3/2 = 89,11 - 73,1 = 16,01^\circ$ .

**Пример 2.3.** Определить максимальную величину временной задержки для прямолинейной антенны из  $n = 5$  точечных элементов, расположенных на равных расстояниях с шагом  $l = 0,5\lambda$  для обеспечения поворота основного лепестка на угол  $\beta = 30^\circ$  на частоте  $f = 15$  кГц при скорости звука  $c = 1500$  м/с.

Таблица 2.10. Направления 100 %-х максимумов

$i$	0	1	2	3	4
$\frac{\lambda_i}{l}$	0	$\pm 0,333$	$\pm 0,666$	$\pm 0,999$	$\pm 1,332$
$\theta_{100\%}^\circ$	0	$\pm 19,45^\circ$	$\pm 41,8^\circ$	$\pm 89,19^\circ$	—

Текущая координата  $x_n$  положения элемента антенны при переносе начала координат в точку 1 (см. рис. 2.53):  $x_n = l(n-1)$ . Полный размер антенны  $D = x_{n \max} = 0,5\lambda \times (5-1) = 2,0\lambda$ . Полагаем, что направление  $\beta$  совпадает с углом  $\theta$ , обозначенным на рис. 2.53. В этом случае максимальная задержка должна быть введена в цепь элемента 5. Эта задержка должна соответствовать разности хода  $\Delta_{\max}$  лучей, идущих по направлению  $\beta$ , относительно элементов 1 и 5. Текущая разность хода  $\Delta_n = 0,5\lambda(n-1) \sin \beta$ . Максимальная разность хода  $\Delta_{\max} = 0,5\lambda(5-1) \sin 30^\circ = 0,5\lambda \cdot 4 \cdot 0,5 = \lambda$ . Длина волны на частоте  $f = 15$  кГц при скорости звука  $c = 1500$  м/с:  $\lambda = c/f = 1500/15000 = 0,1$  м. Время, за которое звук проходит расстояние  $\Delta_n$ :  $t = \Delta_n/c$ ,  $t_{n \max} = \Delta_{n \max}/c = \lambda/c = 0,1/1500 = 0,0006$  (6) = 6,6 (6) мкс.

Таблица 2.11. Направления минимумов у 100 %-х лепестков

$i$	1	7	9	15	17	23	25
$\frac{\lambda_i}{\ln}$	0,042	0,292	0,375	0,625	0,707	0,957	1,04
$\theta_M^\circ$	2,38	16,95	22	38,68	44,99	73,1	—

### 2.7.5. Плоские антенны с компенсированными характеристиками направленности, состоящие из направленных элементов

Реальные антенны во многих случаях выполняются из элементов (секций), имеющих вполне определенную протяженность и, следовательно, направленных.

ХН всей антенны, если секции идентичны, расположены эквидистантно и между ними отсутствует или мало взаимодействие, в соответствии с теоремой умножения имеет вид

$$R(\theta) = \frac{\sin [n(\pi l/\lambda)(\sin \theta - \sin \beta)]}{n \sin [(\pi l/\lambda)(\sin \theta - \sin \beta)]} R_c(\theta),$$

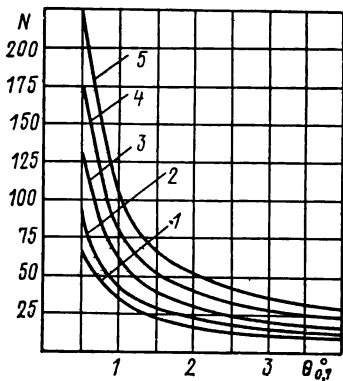


Рис. 2.59. Зависимость количества каналов плоской антенны от угла раствора основного лепестка при различных углах его поворота и уровне боковых лепестков не выше 30 %

1 -  $\beta = 15^\circ$ ; 2 -  $\beta = 20^\circ$ ; 3 -  $\beta = 30^\circ$ ; 4 -  $\beta = 45^\circ$ ; 5 -  $\beta = 60^\circ$

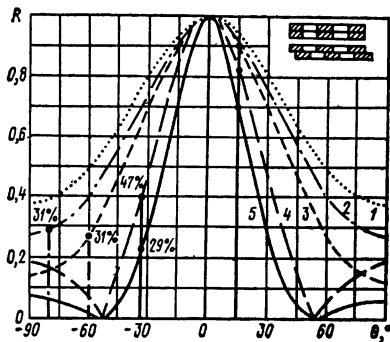


Рис. 2.60. К пояснению влияния направленности секции плоской антенны на компенсированную ХН  
 1 -  $l = 0,7\lambda$ ; 2 -  $l = 0,8\lambda$ ; 3 -  $l = 0,9\lambda$ ;  
 4 -  $l = 1,25\lambda$  (ХН секции вида  $\sin z/2$ );  
 5 -  $l = 1,25\lambda$  (оптимальная для  $\beta = 15^\circ$  ХН секции)

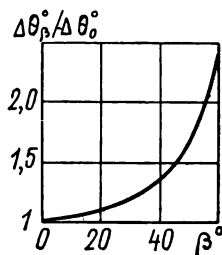
где  $R_c(\theta)$  — характеристика направленности секции, а первый множитель — характеристика направленности антенны из ненаправленных секций с расстоянием между их фазовыми центрами  $l$ .

Обычно протяженность сканирующей антенны значительно превышает длину секции, а характеристики направленности секции шире, чем всей антенны, в результате этого общая характеристика направленности может существенно отличаться от характеристики направленности антенны из ненаправленных секций, особенно при сканировании.

Естественно, каждую антенну следует стремиться составить из минимального количества секций (рис. 2.59).

Разберем на примерах причины, приводящие к ограничению количества секций по минимальному пределу числа каналов у сканирующей антенны. Наиболее простой и часто встречающийся вид секции — с прямоугольной формой раскрыва и ХН вида  $\sin z/z$  — получается делением антенны поперек ее длины плоскими сечениями (рис. 2.60). Здесь кривые 1—4 — ХН прямоугольных секций с протя-

Рис. 2.61. Зависимость относительного угла раствора основного лепестка на уровне 0,7 по давлению ХН от угла ее поворота для дискретной плоской антенны



женностью  $d = 0,7\lambda$ ;  $0,8\lambda$ ;  $0,9\lambda$  и  $1,25\lambda$  соответственно. Вертикальные линии — места расположения основного (на угле  $\beta = +15^\circ$ ) и боковых (стопроцентных в случае выполнения антенны из ненаправленных элементов, на отрицательных углах  $\beta$ ) лепестков при различных расстояниях  $l$  между центрами секций (у антенн из направленных преобразователей размер секции  $d$  отличается от расстояния между их центрами  $l$  только на величину конструктивного зазора между ними).

Поворот основного лепестка антенны ограничивается направленностью секции, ростом боковых лепестков (в местах расположения сниженных стопроцентных — они обозначены так же, как и характеристики направленности соответствующих секций), расширением основного лепестка в связи с уменьшением действующего раскрыва в направлении поворота (рис. 2.61).

У антенны с  $l = 0,7\lambda$  при  $\beta = +26^\circ$  максимум стопроцентного бокового лепестка возникает на угле  $-90^\circ$ . Поворот же основного лепестка (если уровень боковых должен быть меньше 30%) оказывается возможным на угол не более  $+20 \div +23^\circ$  в зависимости от волнового размера антенны, так как чем меньше размер антенны, тем больше в область углов, больших  $-90^\circ$ , заходят нижние уровни правой половины стопроцентного бокового лепестка. Еще больших углов поворота ХН можно достичь при  $l = 0,6\lambda$  — до  $35 \div 38^\circ$ , а при  $l = 0,5\lambda$  — примерно до  $60^\circ$ .

Если число каналов ограничено, ограничен и угол поворота ХН. Так, в случае  $l = 0,8 \div 0,9\lambda$  при уровне боковых лепестков  $\sim 30\%$  поворот ХН оказывается возможным в пределах  $\beta = \pm 15^\circ$ , если же

поворачивать ХН на  $15^\circ$ , имея размер  $l = 1,25\lambda$  секции с ХН аналогичного вида  $\sin z/z$ , уровень боковых лепестков достигает 47%.

В ряде случаев можно допустить большее снижение уровня основного лепестка, чем это обуславливается ХН 1—4 (см. рис. 2.60) — до 0,7. Тогда можно при сохранении угла поворота основного и уровня боковых лепестков свести число каналов к минимальному пределу. Достигается это путем подбора ХН секций такой формы, чтобы получить оптимальное соотношение уровней бокового и основного лепестков. Как видно из рис. 2.60 (кривая 5), ширина основного лепестка у этой секции меньше, чем у секций с таким же расстоянием между их фазовыми центрами при ХН вида  $\sin z/z$  (кривая 4).

Получить ХН с заданной шириной основного лепестка, сохраняя расстояние  $l$  между фазовыми центрами секций неизменным, можно, если сдвинуть часть антенны вдоль ее максимального размера (см. рис. 2.60). Количество каналов по сравнению со случаем  $l = 0,9\lambda$  уменьшается в 1,4 раза.

Подбор оптимальной ХН секции антенны с уменьшенным числом электрических каналов можно производить, пользуясь следующей схемой расчета. По известной ширине основного лепестка ХН антенны при  $\beta = 0^\circ$  и требуемому углу его поворота, используя графики, приведенные на рис. 2.59, находят минимально допустимое число каналов (секций). Таким образом, оказывается известным расстояние  $l$  между фазовыми центрами секции. (Длина антенны может быть определена по ширине основного лепестка при  $\beta = 0^\circ$  по формуле  $\sin z/z$ , рис. 2.4, 2.5 с помощью табл. 2.2.) Затем антенну (секцию) разбивают на два-три ряда по вертикали и сдвигают один или два ряда в горизонтальном направлении (вдоль длины антенны) так, чтобы получить ширину основного лепестка ХН секции в горизонтальной плоскости такой же или несколько большей полного сектора качания ХН антенны.

Возможность управления формой ХН в результате взаимного сдвига ее частей появляется вследствие изменений общего размера секции и амплитудного распределения, возникающего на секции с фигурным раскрытием. Одинаковые ХН могут быть получены при различных соотношениях длины секции и формы амплитудного распределения. Выбор окончательной формы секции очевидно определяется конструктивными соображениями.

В заключение приведем формулу для расчета пространственной характеристики направленности плоской антенны, нормированной к направлению компенсации:

$$R(\theta, \Omega) = R_c(\theta, \Omega) \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} e^{jk(x_n \cos \Omega \sin \theta + y_m \sin \Omega \sin \theta + \Delta_{nm})}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} e^{jk \Delta_{nm}}},$$

где  $R_c(\theta, \Omega)$  — нормированная характеристика направленности секции;  $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M$  — символы, означающие действие суммирования потенциа-

лов секций по двум взаимно перпендикулярным направлениям, параллельным сторонам антенны;  $N, M$  — число секций по этим направлениям, а  $x_n, y_m$  — текущие расстояния до фазовых центров секций от выбранного начала координат;  $A_{nm}, \Delta_{nm}$  — амплитуда и фаза возбуждения секций;  $\theta$  — текущий угол в плоскости, проходящей через главную ось антенны;  $\Omega$  — угол ориентации плоскости, в которой определяется ХН.

На рис. 2.62 показаны ХН плоской антенны при ориентации основного лепестка по направлениям  $\beta = 0^\circ$  и  $\beta = +15^\circ$  при расстоянии между центрами секций  $1,25\lambda$  и ХН секции вида 5 (см. рис. 2.60).

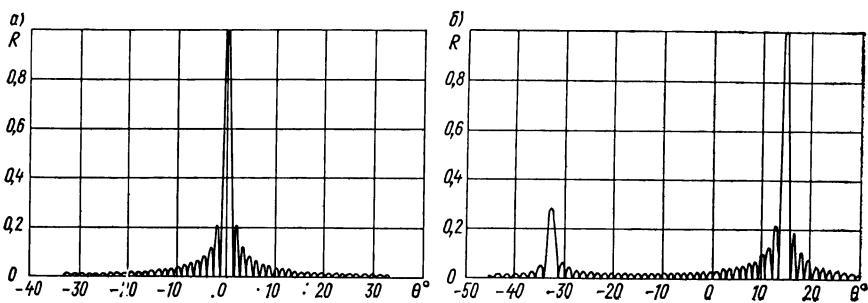


Рис. 2.62. ХН плоской антенны из секций с оптимальной направленностью и расположенных через  $l = 1,25\lambda$ ; а — при аксиальном направлении основного лепестка; б — при компенсации на угол  $\beta = 15^\circ$

Боковые лепестки, за исключением расположенного на угле  $\theta = -32^\circ$ , могут быть уменьшены с помощью введения по секциям спадающего к краям антенны амплитудного распределения.

### 2.7.6. Цилиндрические антенны

Многочисленные цилиндрические антенны применяются для секторного и кругового обзоров. В силу симметрии антенны характеристики направленности получаются идентичными при любой ориентации в плоскости направляющей цилиндра.

Антенны этого типа выполняются в виде замкнутого или части цилиндра (последние называются дугowymi) в зависимости от требуемого сектора обзора.

Методы обзора пространства с помощью цилиндрических антенн могут быть различными. В режиме приема обычно формируется в секторе  $360^\circ$  (иногда меньшем) статический веер, может осуществляться и электрическое вращение одной или нескольких (развернутых на определенные углы и связанных с самостоятельными каналами) компенсированных характеристик направленности (ХН). Облучение пространства производится всенаправленной (круговой) или секторной ХН, формируемой всем цилиндром, либо его частью. Возможно также облучение пространства как веером, так и вращающейся ХН.

На рис. 2.63 приведена схема варианта построения станции, в состав которой входит цилиндрическая антенна из шести секций. При излучении коммутаторы приема — передачи подключают секции антенны к генератору, в результате чего излучается сигнал одинакового уровня в любом направлении. В режиме приема сигнал, поступающий в приемный тракт, вследствие воздействия плоской звуковой

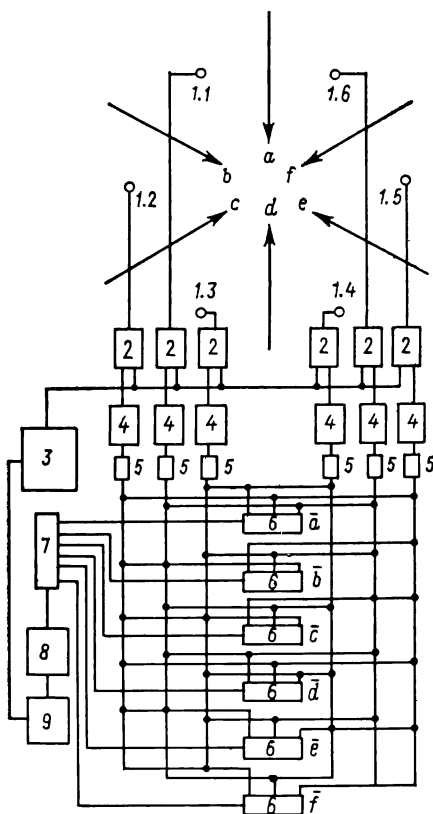


Рис. 2.63. Функциональная схема станции с дискретной цилиндрической антенной при всенаправленном излучении и веере компенсированных характеристик в приеме в азимутальной плоскости

1.1—1.6 — секции антенны; 2 — коммутатор приема — передачи; 3 — генератор мощности; 4 — предварительный усилитель; 5 — развязывающие устройства; 6 — задерживающие цепи; 7 — коммутатор направления; 8 — основной усилитель; 9 — индикатор с синхронизатором

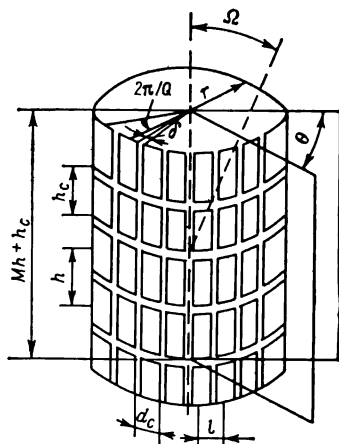


Рис. 2.64. К пояснению выражения для расчета ХН компенсированной цилиндрической антенны

волны, например, с направления  $a$ , максимально задерживается в цепи задержки  $\bar{a}$  на величину времени, за которое звук проходит расстояние от секций 1.1—1.6 до секций 1.3—1.4. Сигнал, поступающий от секций 1.2—1.5, задерживается на меньшее время, наконец, в цепи секций 1.3—1.4 задержки не вводятся. Электронный коммутатор направления 7 за время, равное длительности излучения сигнала, подключает к усилителю 8 различные задерживающие цепи  $\bar{a}$ — $\bar{f}$ , обеспечивая тем самым компенсацию ХН в соответствующих направлениях.

**Цилиндрические антенны с компенсированными характеристиками направленности.** У цилиндрической антенны с компенсированной ХН число каналов ограничивается необходимостью расположения фазовых центров секций на расстоянии, близком к  $0,5\lambda$ . При больших расстояниях растет уровень ореола, боковых лепестков, на углах бо-

лее  $90^\circ$  и падает коэффициент концентрации. Эти изменения проявляются особенно сильно, если расстояние между центрами секций превышает  $0,6\lambda$ . Таким образом, число каналов (секций) цилиндрической антенны в плоскости направляющей может быть найдено по формуле  $Q = (2\pi D/\lambda)$ , где  $D$  — диаметр антенны;  $\lambda$  — длина волны в воде. Размер самой секции следует, по возможности, выбирать максимальным в пределах расстояния  $l$ . Целесообразно даже несколько увеличивать горизонтальный размер секций  $d_c$  при сохранении расстояния между их фазовыми центрами равным  $0,5\lambda$ . Увеличение размера секций снижает взаимодействие между ними по полю и стабилизирует форму их ХН. Увеличить горизонтальный размер секции можно аналогичным применяющимся к плоским антеннам способом: путем дробления секции по вертикали на части и сдвига этих частей по направляющей цилиндра. Однако чрезмерное увеличение размера  $d_c$  нежелательно. У цилиндрических антенн секции развернуты (в силу своего расположения по периметру) и в связи с этим с увеличением угла, соответствующего ориентации главной оси секции, уменьшается ее вклад по осевому направлению антенны при компенсации. Вклад также тем меньше, чем выше направленность секции. Оптимальные размеры секции лежат в пределах  $0,5—0,8\lambda$ .

Направленность секций и их расположение по окружности создают в апертуре при компенсации спадающее к краям амплитудное распределение, снижающее уровень боковых лепестков и расширяющее основную.

Еще одной особенностью цилиндрической антенны является существование оптимального компенсируемого рабочего сектора, равного примерно  $120^\circ$ . Величина этого угла определяется двумя факторами. И меньший, и больший секторы уменьшают коэффициент использования площади антенны: при меньшем секторе расширяется основная лепесток характеристики направленности, при большем — увеличивается уровень ореола, боковых и тыльных лепестков, на углах более  $120^\circ$ . Последнее происходит из-за большого дискрета фазы между соседними секциями, доходящего при скользящих углах падения звука на антенну до  $180^\circ$ .

Формула (2.11) для расчета пространственной характеристики направленности многоэлементной из четного числа секций в азимутальной плоскости цилиндрической антенны с компенсацией в любом направлении получена в предположении, что секции антенны прямоугольной формы и располагаются в жестком цилиндрическом экране. В случае необходимости выражение (2.11) может быть пронормировано к любому направлению, для чего его следует разделить на выражение, содержащее конкретные значения углов  $\theta$  и  $\Omega$  ориентации максимума основного лепестка. При расчете ХН антенны, состоящей в азимутальной плоскости из нечетного числа секций, следует произвести замену  $n$  на  $n + 1/2$

$$R(\theta, \Omega) = \frac{\sin \left[ \frac{\pi}{\lambda} (Mh + h_c) \cos \Omega \right]}{\frac{\pi}{\lambda} (Mh + h_c) \cos \Omega} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} A_{mn} \times$$

$$\times e^{jk[r \cos(n2\pi/Q) - mh \cos \Omega]} \frac{1}{\sin \Omega} \times$$

$$\times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \left[ i \left( \frac{2\pi}{Q} - \delta \right) \right] \cos \left[ i \left( \theta + n \frac{2\pi}{Q} \right) \right]'}{i \varepsilon_i \left[ H_i^{(1)}(kr \sin \Omega) \right]'} e^{-j \left( i \frac{\pi}{2} \right)}, \quad (2.11)$$

где первый сомножитель определяет некомпенсированную характеристику направленности линейной антенны с апертурой  $Mh + h_c$  (высота цилиндра) в плоскости образующей (рис. 2.64); последний сомножитель, включающий сумму, представляет собой поле прямоугольного вибратора, расположенного на жестком цилиндрическом экране [56];  $M$  — число секций в угломестной плоскости;  $N + 1$  — число секций в рабочем секторе в азимутальной плоскости;  $Q$  — полное число секций в азимутальной плоскости в секторе  $360^\circ$ ;

$$\sum_{n=-N/2}^{N/2} \sum_{m=-M/2}^{M/2} -$$

символы суммирования по секциям;  $h_c$ ,  $h$  — размер секций и расстояние между ними в угломестной плоскости (плоскости образующей);  $A_{mn}$  — амплитуды возбуждения секций;  $2\pi/Q$  — угловое расстояние между центрами секций по азимуту;  $r$  — радиус цилиндра;  $(2\pi/Q) - \delta$  — угловой размер секции по азимуту;  $\delta$  — угловой конструктивный зазор между активными поверхностями секций по азимуту. Если оказывается необходимым выполнить секцию таким образом, чтобы размер ее был больше расстояния между секциями (за счет сдвига частей секции), при расчете следует выбирать размеры  $h_c$  или  $(2\pi/Q) - \delta$  такими, чтобы характеристика направленности была

по ширине такой же, как у прямоугольной секции;  $\varepsilon_i = \begin{cases} 2 & i=0 \\ 1 & i \neq 0 \end{cases}$ ;

$H_i^{(1)}$  — функция Ганкеля  $i$ -го порядка первого рода [54];  $\theta$ ,  $\Omega$  — азимутальное и угломестное направление на точку наблюдения. Штрих при косинусе и функции Ганкеля означает первую производную от этих функций. Первое слагаемое в показателе экспоненты обуславливает компенсацию в азимутальной, а второе — в угломестной плоскости.

Наиболее интересен при проектировании рыбопоисковых антенн случай расчета характеристики направленности в азимутальной плоскости при  $\Omega = \pi/2$ . Тогда выражение (2.11) принимает вид (рис. 2.65) [44]

$$R(\theta) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} A_n e^{jk \left[ r \cos \left( n \frac{2\pi}{Q} \right) \right]} \times$$

$$\times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin \left[ i \left( \frac{2\pi}{Q} - \delta \right) \right] \cos \left[ i \left( \theta + n \frac{2\pi}{Q} \right) \right]'}{i \varepsilon_i \left[ H_i^{(1)}(kr) \right]'} e^{-j \left( i \frac{\pi}{2} \right)}.$$



**Некомпенсированные цилиндрические антенны.** Некомпенсированные цилиндрические антенны применяются для излучения большой мощности при широкой ХН, когда использование плоских антенн оказывается невозможным из-за недопустимо большой удельной мощности. Так, например, круглый плоский поршень с шириной основного лепестка характеристики направленности порядка  $60^\circ$  должен иметь на частоте 30 кГц диаметр примерно 5 см, и, следовательно, его площадь оказывается равной  $\sim 20 \text{ см}^2$ . Если при этом необходимо излучить умеренную акустическую мощность 500 Вт, то удельная

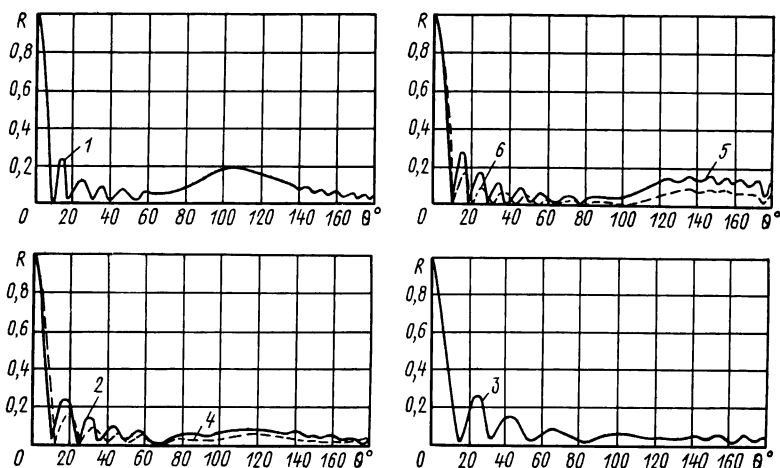


Рис. 2.65. Компенсированные в азимутальной плоскости ХН цилиндрической антенны при равенстве угловых размеров секций промежуткам между их центрами

1 —  $0,6\lambda$ ; 2 —  $0,5\lambda$ ; 3 —  $0,3\lambda$  (равномерное возбуждение); 4 —  $0,5\lambda$  (косинусоидальное амплитудное распределение) — сектор  $120^\circ$ ; 5 —  $0,3\lambda$  (равномерное возбуждение); 6 —  $0,5\lambda$  (косинусоидальное амплитудное распределение) — сектор  $160^\circ$

(на единицу поверхности поршня) мощность окажется равной  $25 \text{ Вт/см}^2$ . Такая удельная мощность недопустима как с точки зрения механической прочности вибратора, так и кавитационной прочности воды. ХН некомпенсированного сектора цилиндрической антенны можно вычислить, пользуясь нижеприведенным выражением

$$R(\theta) = \frac{1}{Q} \sqrt{\left\{ \sum_{n=1}^N A_n [1 + \cos(n\alpha - \theta)] \cos [kr \cos(n\alpha - \theta)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{n=1}^N A_n [1 + \cos(n\alpha - \theta)] \sin [kr \cos(n\alpha - \theta)] \right\}^2},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\theta$  — текущий угол характеристики направленности;  $r$  — радиус кривизны дуги;  $\alpha$  — центральный угол между центрами соседних преобразователей;  $N$  — число преобразователей по дуге;  $Q$  — нормирующий коэффициент;  $A_n$  — амплитуды возбуждения пре-

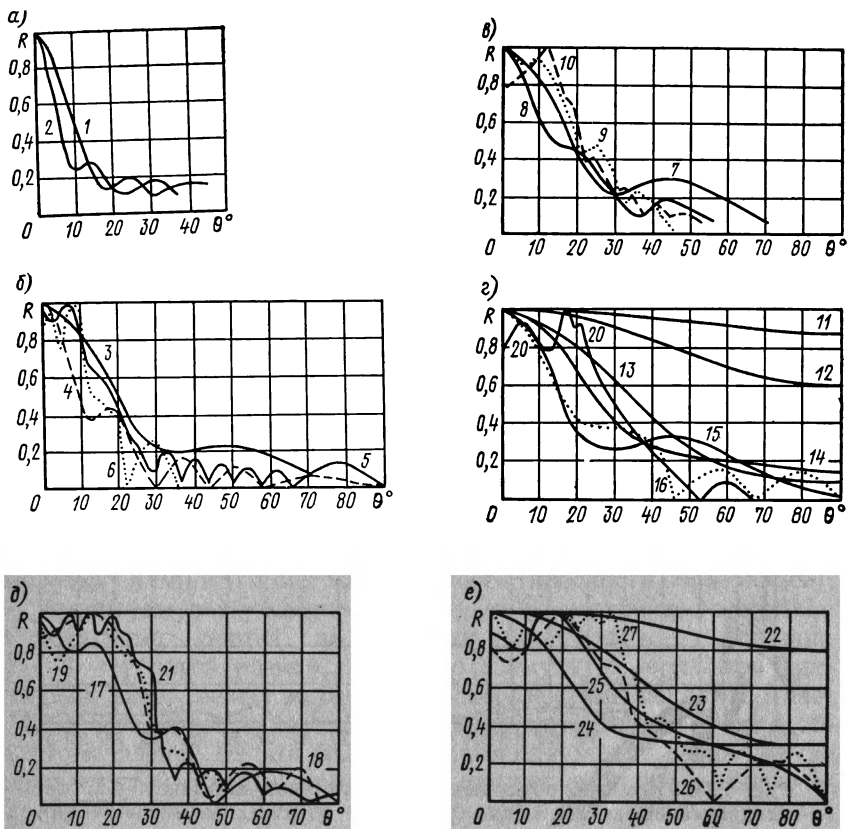


Рис. 2.66. Видоизменение ХН некомпенсированной дуговой антенны в зависимости от центрального угла  $\alpha$ , радиуса кривизны  $r/\lambda$  и стрелы прогиба  $h/\lambda$ : а —  $\alpha = 15^\circ$ ; б —  $\alpha = 30^\circ$ ; в —  $\alpha = 45^\circ$ ; г, д —  $\alpha = 60^\circ$ ; е —  $\alpha = 90^\circ$ ; ж —  $\alpha = 120^\circ$

1 — 14 (0,1); 2 — 24 (0,75); 3 — 3,75 (0,128); 4 — 9 (0,3); 5 — 18 (0,6); 6 — 54 (1,8); 7 — 2,5 (0,19); 8 — 5 (0,38); 9 — 7 (0,53); 10 — 14 (1,06); 11 — 0,25 (0,034); 12 — 0,5 (0,067); 13 — 1 (0,134); 14 — 1,5 (0,2); 15 — 2 (0,268); 16 — 2,5 (0,335); 17 — 4 (0,54); 18 — 8 (1,07); 19 — 10 (1,4); 20 — 14 (1,88); 21 — 16 (2,15); 22 — 0,25 (0,074); 23 — 0,5 (0,147); 24 — 1 (0,294); 25 — 2 (0,59); 26 — 4 (1,18); 27 — 8 (2,64); 28 — 0,25 (0,125); 29 — 0,5 (0,25); 30 — 1 (0,5); 31 — 2 (1); 32 — 4 (2); 33 — 8 (4)

образователей;  $1 + \cos(n\alpha - \theta)$  — коэффициент, учитывающий затенение, возникающее из-за расположения преобразователей по дуге.

Видоизменение формы характеристики направленности дуги зависит от стрелы прогиба  $h$ , радиуса кривизны  $r$  и рабочего сектора  $\alpha_0$  (центрального угла, длины дуги  $L$  или хорды  $a$ ). Эти параметры связаны между собой следующими соотношениями:  $h = (a/2) \operatorname{tg} \alpha/4 =$

$= r(1 - \cos \alpha_0/2)$ ;  $L = 0,01745 r \alpha_0$ ;  $a = 2r \sin \alpha_0/2$ . Наиболее чувствительна форма ХН к волновой величине стрелы прогиба (рис. 2.66). Комбинированием между величинами стрелы прогиба, центрального угла и видом амплитудного распределения можно успешно регулировать форму ХН по уровням осцилляции, ширине основного и величинам боковых лепестков [44]. По вопросам расчета многоэлементных антенн см. [2, 4, 8, 21, 42, 43, 44].

### 2.7.7. Антенны доплеровских лагов

Эти антенны предназначены для абсолютных гидроакустических измерителей скорости движения судна, работа которых основана на анализе изменения частоты излучаемого сигнала и отраженного от дна. Требования к параметрам антенны гидроакустического лага вытекают из соотношения  $\Delta f_d/f_d = \operatorname{tg}(90^\circ - \beta) \Delta \theta_{0,7}$  [49], где  $f_d$  — доплеровский сдвиг частоты,  $\Delta f_d$  — ширина спектра отраженного сигнала,  $\Delta \theta_{0,7}$  и  $\beta$  — углы раствора и отклонения от вертикального направления основного лепестка. В соответствии с этим выражением точность измерения скорости судна тем выше, чем меньше  $\Delta \theta_{0,7}$  и больше  $\beta$ . Однако предельно допустимые значения этих величин ограничиваются возможностью потери контакта в случае чрезмерно малых  $\Delta \theta_{0,7}$  и больших  $\beta$  из-за движения и качки судна и уменьшения коэффициента отражения от грунта. Оптимальные значения этих величин:  $\Delta \theta_{0,7} \approx 3 \div 5^\circ$ ,  $\beta \approx 30 \div 45^\circ$ . В случае использования антенны, формирующей характеристику направленности (ХН) с одним наклоненным в диаметральной плоскости судна основным лепестком, зависимость доплеровского сдвига частоты от скорости судна нелинейна:  $f_n = f [1 + (2v \sin \beta/c) + (2v^2 \sin^2 \beta/c^2) + \dots]$  — основной лепесток повернут в сторону носа судна  $f_k = f [1 - (2v \sin \beta/c) + (2v^2 \sin^2 \beta/c^2) + \dots]$  — основной лепесток повернут в сторону кормы. Устранение нелинейности достигается использованием антенного устройства с двумя лепестками, носовым и кормовым, путем определения разности частот по носовому и кормовому направлениям:  $f_{нк} = f_n - f_k = f(4v \sin \beta/c)$ . Таким образом измеряется продольная составляющая скорости судна. При желании знать и поперечную составляющую скорости движения судна антенную систему следует строить так, чтобы формировать 4 лепестка, развернутых в азимутальной плоскости на углы  $90^\circ$  между собой.

Ориентация основных лепестков в пространстве может быть достигнута разными способами. Один из них — применение обычных сплошных однолепестковых поршневых вибраторов, развернутых на необходимые углы. Число вибраторов в этом случае равняется необходимому числу основных лепестков. Частотно-независимые доплеровские антенны устраняют ошибку, возникающую при изменении скорости звука в воде за счет эффекта зависимости угла поворота основного лепестка при изменении длины волны. Возможны различные варианты выполнения таких антенн. Например, путем построения многоканальной плоской антенны с компенсированными характеристиками. Антенна строится следующим образом. Для формирова-

ния двух лепестков, развернутых в диаметральной плоскости, антенна разбивается на секции с шагом  $l = 0,5\lambda$ . Необходимое количество секций у антенны с пятиградусной характеристикой составит 20, а с трехградусной — 33. Для получения ХН, развернутых на  $90^\circ$  к диаметральной плоскости, требуется еще одна антенна с таким же ко-

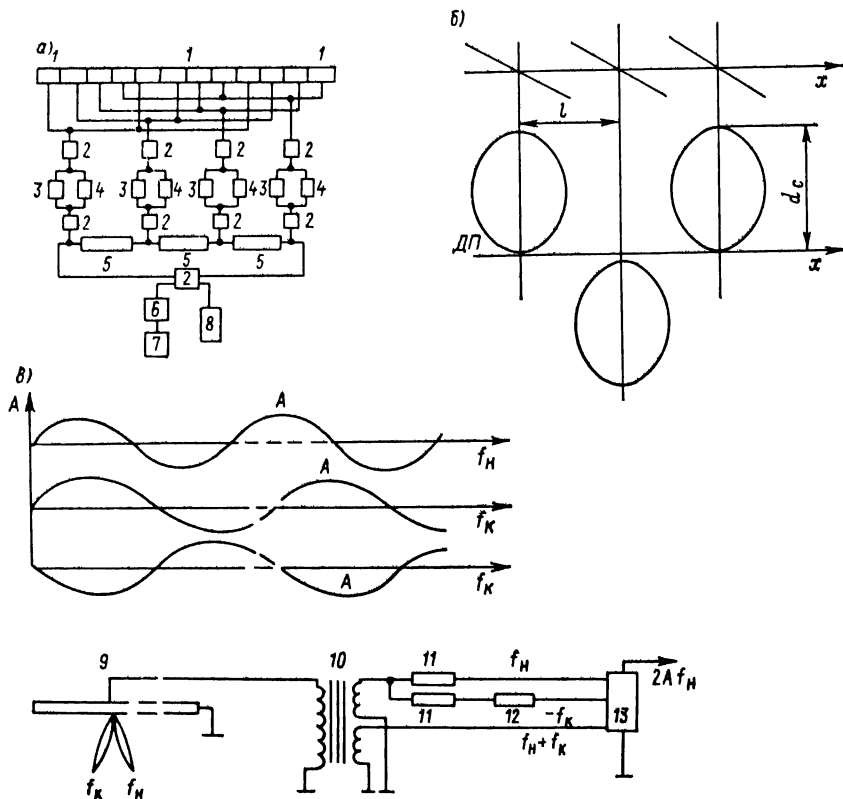


Рис. 2.67. К пояснению построения частотно-зависимых антенн доплеровских лагов: *a* — функциональная схема формирования двух развернутых ХН с помощью линий задержки; *б* — формирование повернутых характеристик с помощью разворота секций антенны; *в* — пример разделения направлений приема при использовании антенны с противофазным возбуждением секций

1 — секции антенны; 2 — коммутаторы приема—передачи; 3 — предварительные усилители; 4 — усилители мощности; 5 — линии задержки; 6 — основной усилитель; 7 — фильтры; 8 — задающий генератор; 9 — антенна; 10 — трансформатор; 11 — фильтры; 12 — фазовращатель; 13 — сумматор

личеством секций. Между секциями вводится сдвиг фазы с помощью временной линии задержки с соответствующим дискретом компенсации на угол  $30^\circ$ . Разворот ХН на противоположные углы ( $\pm \beta$ ) получается при возбуждении системы (семе сигнала в приеме) на противоположных концах линии (рис. 2.67, *a*).

Более простым решением представляется следующее. В соответствии с формулой  $\sin \beta_{\epsilon i} = \sin \beta \pm (\lambda/l) i = \sin \beta \pm (c/fl) i$  существует зависимость ориентации стопроцентных боковых лепестков ха-

рактеристики направленности от скорости звука в воде. Используя эту зависимость, можно построить частотно-независимую доплеровскую антенну без применения компенсации, с числом каналов, равным числу требуемых основных лепестков.

Рассмотрим построение такого антенного устройства на примере. Полагаем антенну многоэлементной с межсекционными расстояниями большими, чем длина волны, с целью формирования ХН со стопроцентными боковыми лепестками. Предположим вначале, что антенна состоит из ненаправленных секций. Задается направлению боковых лепестков  $\beta_i$ , равными  $\pm 30^\circ$ , и минимальным их числом. Ширину основного лепестка на рабочей частоте  $f = 50$  кГц ( $\lambda = 0,03$  м) выбираем равной  $5^\circ$ . При таких условиях размер плоской антенны должен быть следующим:

$$D = 50,5 \lambda / \Delta \theta_{0,7} \cos \beta_i = (50,5 \cdot 0,03) / (5 \cdot 0,866) = 0,35 \text{ м.}$$

Определяем шаг расположения секций:  $\sin \beta_i = \sin \beta \pm (\lambda/l) i$ ;  $l = (\lambda / \sin \beta_1) 1 = 0,03 / \sin 30^\circ = 0,06$  м.

Таким образом, межсекционное расстояние должно равняться двум длинам волн. Углы ориентации вторых стопроцентных боковых лепестков равны  $\arcsin \sin \beta_2 = \sin \beta \pm (\lambda/l) i = \sin 0^\circ \pm (0,03/0,06) 2 = \pm 90^\circ$ .

Число секций, составляющих антенну, равно  $D/l = 0,35/0,06 \approx 6$ . Уточним размер антенны;  $D = 0,36$  м. Осуществим построение ХН плоской прямоугольной антенны, состоящей из шести ненаправленных секций, при межсекционном расстоянии  $l = 2\lambda$ . Определим направления минимумов по формуле  $\arcsin \theta_m = \pm \lambda i / l n$  и уровни максимумов по формуле  $R(\theta)_m = 1/n \sin \{[(2i+1)/n] \pi\}$ . Имеем  $\arcsin \theta_m = \pm 0,03i/0,06 \cdot 6$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ , кроме кратных  $n$ , и  $R(\theta)_\sigma = 1/6 \sin [(2i+1)/6 \cdot 3,1416]$ , где  $i = 1, 2, \dots, 10$ , кроме кратных  $n$ . Результаты расчета сведены в табл. 2.12, 2.13. ХН представлена на рис. 2.68 кривой 1. Для работы в направлении носовых углов стопроцентные лепестки I, II, III, V должны быть устранены. Для работы в кормовом направлении устраняют лепестки I, III, IV, V. Этого можно достичь путем управления ХН секций. Полагаем, что размер прямоугольной секции  $\alpha = 2\lambda$ . Поворот может быть достигнут путем дробления каждой секции на четыре подсекции и введения по ним фазового распределения (см. рис. 2.67, а). Подсекции с одинаковыми порядковыми номерами в секциях могут быть включены параллельно. Таким образом, для формирования одного или двух развернутых стопроцентных лепестков потребуется четыре канала. Характеристика направленности такой секции, повернутая на угол  $\beta = 30^\circ$ , на рис. 2.68 изображена под номером 2. Расчет выполнен по формуле

$$\frac{\sin \left[ n \frac{\pi d_c}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta) \right]}{n \sin \left[ \frac{\pi d_c}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta) \right]} = \frac{\sin \left[ 4 \frac{3,14 \cdot 0,015}{0,03} (\sin \theta + \sin 30^\circ) \right]}{4 \sin \left[ 3,14 \frac{0,015}{0,03} (\sin \theta + \sin 30^\circ) \right]}.$$

Результаты расчета сведены в табл. 2.14. Результирующая ХН обозначена номером 3 (см. рис. 2.68).

Второй вариант решения задачи — поворот непосредственно самой секции на угол  $30^\circ$  (см. рис. 2.67, б). Секцию при этом целесообразно выбрать такой, чтобы ее характеристика направленности не имела боковых лепестков большого уровня на углах расположения стопроцентных лепестков антенны из ненаправленных секций (базы). Необходимо также, чтобы соседние секции при ступенчатом расположении не затеняли одна другую в рабочем секторе углов. Одним из возможных вариантов может быть применение секций, имеющих круглую апертуру (односторонний плоский поршень), у которых уровень боковых лепестков составляет 13%. Нужно, чтобы первый ноль ХН секции совпал с направлением основного лепестка антенны — с углом  $\theta = 0^\circ$ . Обратимся к рис. 2.11. Первый ноль функций  $[2J_1(z)]/z$  находится при значении аргумента  $z = (\pi d/\lambda) \sin \theta = 3,8$ . Отсюда  $d_c = (3,8)\lambda / (\pi \sin \beta) = (3,8 \cdot 0,03) / (3,142 \cdot 0,5) =$

Таблица 2.12 Направления минимумов ХН

$i_M$	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11
$\theta_M^0$	4,78	9,59	14,47	19,46	24,61	35,68	41,81	48,59	56,41	66,39

Таблица 2.13. К расчету ХН антенны из ненаправленных секций

$i_\sigma$	1	2	3	4	5	7	8	9	10
$0,262(2i_\sigma + 1)$	0,786	1,310	1,834	2,358	2,882	3,930	4,454	4,979	5,502
$\sin 0,262(2i_\sigma + 1)$	0,708	0,966	0,966	0,706	0,256	-0,709	-0,967	-0,965	-0,704
$ R(\theta)_\sigma $	0,235	0,173	0,173	0,236	0,649	0,235	0,172	0,173	0,237

Таблица 2.14. К расчету ХН антенны с поворотом секций

$\theta^\circ$	0	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$	$\pm 40$	$\pm 50$	$\pm 60$	$\pm 70$	$\pm 75$	$\pm 80$	$\pm 90$
$\sin \theta$	0,0	$\pm 0,087$	$\pm 0,174$	$\pm 0,342$	$\pm 0,50$	$\pm 0,643$	$\pm 0,760$	$\pm 0,866$	$\pm 0,940$	$\pm 0,966$	$\pm 0,985$	$\pm 1,0$
$\sin \theta + \sin \beta$	-0,5	0,587 -0,413	0,674 -0,326	0,842 -0,158	1,00 0,00	1,143 -0,143	1,266 -0,266	1,366 -0,366	1,440 -0,440	1,466 -0,466	1,485 -0,485	1,500 -0,500
$\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta)$	-0,785	0,922 -0,648	1,058 -0,512	1,322 -0,248	1,571 0,00	1,795 -0,225	1,988 -0,418	2,145 -0,575	2,261 -0,691	2,303 -0,732	2,333 -0,762	2,356 -0,785
$n \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta)$	-3,142	3,688 -2,592	4,232 -2,048	5,288 0,992	6,283 0,00	7,180 -0,90	7,952 -1,672	8,580 -2,300	9,044 -2,764	9,208 -2,928	9,332 -3,048	9,424 -3,142
$\sin \left[ \frac{n\pi d}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta) \right]$	0	-0,520 -0,522	-0,887 -0,888	-0,839 0,837	0,00 0,00	0,781 -0,783	0,995 -0,995	0,748 -0,746	0,372 -0,369	0,215 -0,212	0,093 -0,093	0,00 0,00
$\sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta) \right]$	-0,707	0,797 -0,604	0,871 -0,490	0,969 -0,245	1,00 0,00	0,945 -0,223	0,914 -0,406	0,840 -0,544	0,771 -0,637	0,744 -0,668	0,723 -0,690	0,707 -0,707
$n \sin \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta + \sin \beta) \right]$	-2,828	3,188 -2,418	3,484 -1,960	3,876 0,98	4,00 0,00	3,780 -0,892	3,656 -1,624	3,360 -2,176	3,084 -2,548	2,976 -2,672	2,892 -2,76	2,838 -2,838
$ R(\theta) $	0,0	0,163 0,216	0,255 0,453	0,216 0,854	0,00 0,00	0,207 0,878	0,272 0,613	0,222 0,343	0,121 0,145	0,072 0,079	0,032 0,034	0,0 0,0

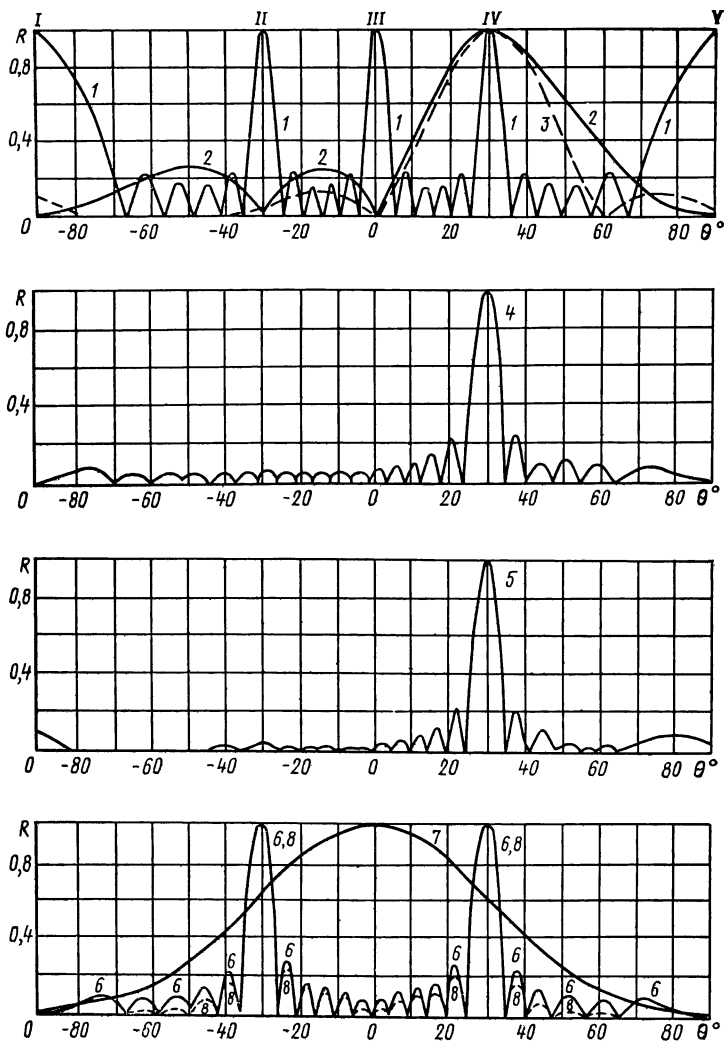


Рис. 2.68. ХН доплеровских лагов

1 — ХН линейной антенны из ненаправленных секций при шаге  $2\lambda$ ; 2 — ХН фазированной секции, разбитой на четыре подсекции; 3 — ХН развернутой секции; 4 — результирующая ХН от перемножения кривых 1 и 2; 5 — результирующая характеристика направленности от перемножения кривых 1 и 3; 6 — ХН линейной антенны с противофазным возбуждением секций, расположенных с дискретом  $\lambda$ ; 7 — ХН секции; 8 — результирующая ХН

$= 0,0726$  м и  $d/\lambda = 0,0726/0,03 = 2,44$ . Здесь  $\beta$  — угол поворота апертуры секции. Возможное расположение секций с шагом  $l/\lambda = 0,5$  показано на рис. 2.67, б. ХН секции изображена на рис. 2.68 под номером 3, а расчетные значения сведены в табл. 2.15. В результате перемножения кривых 1 и 3 (см. рис. 2.68) получена ХН 5.

Еще один вариант антенны может быть построен следующим образом. Антенна составляется из секций размером  $d \approx \lambda$  с шагом  $l = \lambda$ . Между секциями



Таблица 2.15. К расчету ХН антенны с поворотом секций

$\theta^\circ$	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90
$\sin \theta$	0,00	0,087	0,174	0,259	0,342	0,50	0,643	0,766	0,866	0,940	0,945	1,00
$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$	0,00	0,661	1,320	1,968	2,599	3,80	4,887	5,822	6,582	7,144	7,182	7,600
$\frac{2^{\beta_1} \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta}$	1,00	0,92	0,79	0,58	0,36	0,00	0,125	0,11	0,04	0,01	0,015	0,04

вводится фазовый сдвиг на  $180^\circ$ . При таких параметрах у ХН антенны из ненаправленных элементов образуется два стопроцентных противофазных лепестка, развернутых на углы  $\beta = \pm 30^\circ$ , а основной лепесток по нулевому направлению не возникает. Конструкция антенного устройства упрощается, так как сдвиг фазы между соседними секциями на  $180^\circ$  может быть получен их противофазным включением. В частном случае при использовании пьезокерамических преобразователей (например, стержневых или пластинчатых, см. гл. 3) возможна их установка с противоположной ориентацией полярности. Такое построение антенны требует специальной электрической схемы для устранения неоднозначности сигналов, полученных по направлениям двух лепестков. На рис. 2.67, в показан один из возможных принципов построения такой схемы. Сигналы, полученные по носовому ( $f_n$ ) и кормовому ( $f_k$ ) направлениям от согласующего трансформатора, расфильтровываются, и один из них сдвигается на полпериода. Затем производится суммирование, в результате которого один из сигналов удваивается, а другой вычитается.

ХН антенны из ненаправленных элементов рассчитывалась по формуле

$$\frac{\sin [n (\pi l / \lambda) (\sin \theta - \sin \beta)]}{n \sin [\pi l / \lambda (\sin \theta - \sin \beta)]} = \frac{\sin [12 (3,14 \cdot 0,03) / 0,03 (\sin \theta - 0,5)]}{12 \sin [3,14 (0,03 / 0,03) (\sin \theta - 0,5)]}$$

Число секций взято равным 12, чтобы иметь равновеликую антенну с рассмотренными выше из 6 секций размером  $2\lambda$ .

ХН секции размером  $d = \lambda$  рассчитана по формуле

$$[\sin (\pi d / \lambda \sin \theta)] / \pi d / \lambda \sin \theta = [\sin (3,14 \times \times 0,03 / 0,03 \sin \theta) / 3,14 (0,03 / 0,03) \sin \theta]$$

(табл. 2.16, 2.17).

## §. 2.8. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

При излучении гармонической волны изменения плотности воды не точно пропорциональны переменному давлению, проявляется

Таблица 2.16. К расчету ХН антенны с противофазным включением

$\theta^\circ$	0	3,7	7	10	12,5
$\sin \theta$	0,00	0,065	0,122	0,174	0,216
$\sin \theta - \sin \beta$	-0,5	-0,435	-0,375	-0,326	-0,284
$\frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	-1,571	-1,367	-1,188	-1,624	-0,892
$n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	-18,852	-16,404	-14,256	-12,288	-10,704
$\sin \left[ n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-0,002	0,647	-0,993	0,275	-0,958
$\sin \left[ \pi \frac{l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-1,000	-0,979	-0,928	-0,854	-0,746
$n \sin \left[ \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-12,00	-11,748	-11,136	-10,248	-8,952
$ R(\theta) $	0,0002	0,055	0,09	0,027	0,110
$\theta^\circ$	15	17,5	20	22,5	27,5
$\sin \theta$	0,259	0,300	0,342	0,383	0,462
$\sin \theta - \sin \beta$	-0,241	-0,200	-0,158	-0,117	-0,038
$\frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	-0,757	-0,628	-0,496	-0,368	-0,119
$n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	-9,084	-7,536	-5,952	-4,416	-1,428
$\sin \left[ n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-0,334	-0,947	0,325	+0,956	-0,990
$\sin \left[ \pi \frac{l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-0,687	-0,588	-0,476	-0,360	-0,119

$\theta^\circ$	15	17,5	20	22,5	27,5
$n \sin \left[ \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-8,244	-7,056	-5,712	-4,320	-1,536
$ R(\theta) $	0,040	0,135	0,057	0,22	0,730
$\theta^\circ$	30	34	38	42	45
$\sin \theta$	0,500	0,559	0,616	0,669	0,707
$\sin \theta - \sin \beta$	0,000	0,059	0,116	0,169	0,207
$\frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	0,000	0,185	0,364	0,530	0,650
$n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	0,000	2,200	4,368	6,360	7,800
$\sin \left[ n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,000	0,797	-0,941	0,077	0,999
$\sin \left[ \pi \frac{l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,000	0,184	0,356	0,506	0,605
$n \sin \left[ \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,000	2,208	4,272	6,072	7,260
$ R(\theta) $	1,000	0,360	0,220	0,013	0,138
$\theta^\circ$	48	53	57	62	66
$\sin \theta$	0,743	0,799	0,839	0,883	0,914
$\sin \theta - \sin \beta$	0,243	0,299	0,339	0,383	0,414
$\frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	0,763	0,939	1,065	1,203	1,301

$\theta^\circ$	48	53	57	62	66
$n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	9,156	11,268	12,780	14,436	15,612
$\sin \left[ n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,266	-0,963	0,212	0,956	0,096
$\sin \left[ \pi \frac{l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,691	0,807	0,875	0,933	0,964
$n \sin \left[ \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	8,292	9,684	10,500	11,196	11,568
$ R(\theta) $	0,032	0,100	0,020	0,090	0,008
$\theta^\circ$	70	75	80	85	90
$\sin \theta$	0,940	0,966	0,985	0,996	1,00
$\sin \theta - \sin \beta$	0,440	0,466	0,485	0,496	0,5
$\frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	1,382	1,464	1,524	1,558	1,571
$n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta)$	16,596	17,568	18,288	18,691	18,852
$\sin \left[ n \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	-0,776	-0,958	-0,533	-0,153	0,000
$\sin \left[ \pi \frac{l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	0,982	0,994	0,999	0,999	1,000
$n \sin \left[ \frac{\pi l}{\lambda} (\sin \theta - \sin \beta) \right]$	11,784	11,930	11,988	11,988	12,000
$ R(\theta) $	0,070	0,080	0,040	0,013	0,002

Таблица 2.17. К расчету ХН секции антенны с противофазным включением

$\theta^\circ$	0	10	20	30	40
$\sin \theta$	0	0,174	0,342	0,500	0,643
$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$	0	0,547	1,074	1,571	2,020
$\frac{\sin(\pi d/\lambda \sin \theta)}{\pi d/\lambda \sin \theta}$	1,0	0,94	0,81	0,63	0,44

Продолжение табл. 2 17

$\theta^\circ$	50	60	70	80	90
$\sin \theta$	0,766	0,866	0,940	0,985	1,0
$\frac{\pi l}{\lambda} \sin \theta$	2,406	2,721	2,953	3,094	3,142
$\frac{\sin(\pi d/\lambda \sin \theta)}{\pi d/\lambda \sin \theta}$	0,27	0,15	0,06	0,04	0,00

зависимость скорости звука от величины амплитуды давления. Этот эффект нелинейности замечен в тем большей мере, чем больше примесей содержится в воде. В результате образуются дополнительные гармонические составляющие. При излучении нескольких гармонических сигналов высокого уровня возникают суперпозиционные частоты. С увеличением дистанции от излучателя в связи с потерями происходит преимущественное затухание высокочастотных составляющих. Низкочастотному разностному сигналу присуща наибольшая дальность распространения. Достоинством параметрических антенн является возможность формирования с их помощью остронаправленных практически безлепестковых ХН при малых волновых размерах возбуждающего вибратора. Роль формирователя ХН играет водный объем. При этом ширина ХН представляет собой функцию разности возбуждающих частот и коэффициента поглощения. Отрицательным фактором параметрических антенн является их малый коэффициент полезного действия. Тем не менее в ряде случаев такие устройства могут оказаться полезными, в частности, когда антенна должна быть

малогабаритной, а по мощности возбуждения имеется определенный запас.

Подробно принципы работы и построения параметрических антенн рассмотрены в [33, 40]. Ниже приводятся некоторые данные из этих источников, пользуясь которыми можно выполнять расчет антенн параметрического типа. На рис. 2.69 приведена номограмма для определения основных параметров параметрического излучателя по

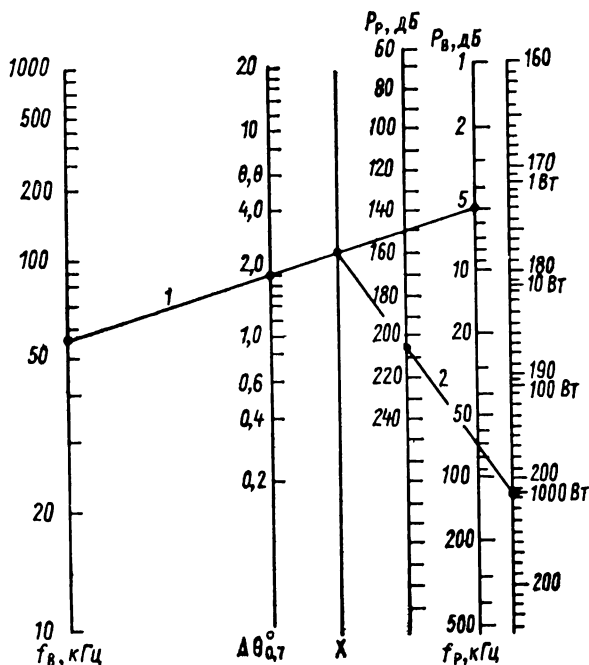


Рис. 2.69. Номограмма для определения параметров излучающей параметрической антенны

теории, разработанной Вестервельтом. Номограмма дает связь параметров в явном виде. Более точные значения можно получить, пользуясь номограммами из приложения [33]. Однако анализ свойств антенн с их помощью менее нагляден, так как имеются в виду обобщенные параметры.

Предположим, что необходимо сформировать на частоте 5 кГц характеристику направленности с основным лепестком шириной  $2^\circ$ . Для этого из точки 5 на оси  $f_p$  (см. рис. 2.69) проводим прямую через точку 2 на оси  $\Delta\theta_{0,7}$  до пересечения с осью  $f_v$ , на которой отмечаем среднюю частоту возбуждения 57 кГц. Далее задаемся необходимым уровнем излучения. Полагаем, что он должен составлять 20 000 Па·м, что соответствует 206 дБ относительно давления в 1 мкПа. Далее, для определения необходимой излучаемой мощности возбуждения (уровня излучения) соединяем точку пересечения прямой 1 с осью X

и точку 206 на оси  $P_p$  и продлеваем прямую 2 до пересечения с осью  $P_v$ . Полученная цифра 1000 Вт (или уровень излучения 201,5 дБ) есть основная величина.

ХН параметрического приемника адекватна ХН продольно-компенсированной линейной антенны. Ширина ее основного лепестка может быть найдена по формуле  $\Delta\theta_{0,7} = 139 (f_c D)^{-1/2}$ , где  $f_c$  — частота полезного сигнала;  $D$  — расстояние между излучателем возбуждения и гидрофоном.

## § 2.9. КОЭФФИЦИЕНТ КОНЦЕНТРАЦИИ, ИЗЛУЧАЕМАЯ МОЩНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

### 2.9.1. Мощность и коэффициент концентрации

Как уже отмечалось выше, коэффициент концентрации  $K$  есть отношение, показывающее, во сколько раз большую мощность должен отдавать ненаправленный источник звука по сравнению с направленной антенной, создающей в заданной точке пространства одинаковую с направленной антенной интенсивность звука.

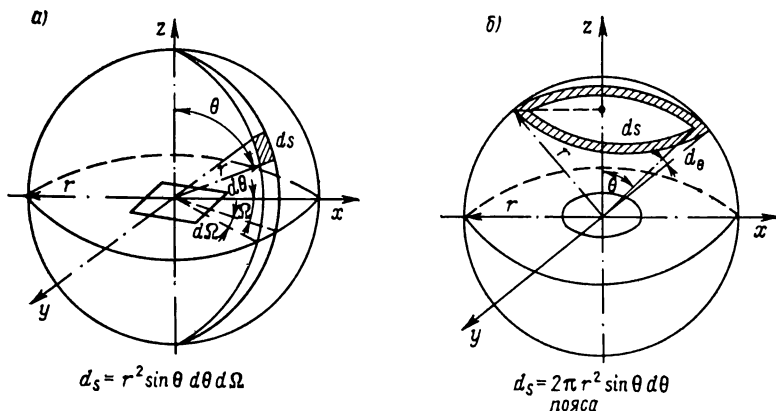


Рис. 2.70. К пояснению выражений для расчета коэффициента концентрации

Акустическая мощность, излучаемая ненаправленным источником  $W_0 = [P^2/\rho c] S = (P^2/\rho c) 4\pi r^2$ , где  $P$  — развиваемое давление;  $\rho c$  — волновое сопротивление среды;  $S = 4\pi r^2$  — поверхность сферы на расстоянии  $r$  от центра излучения.

Акустическая мощность антенны  $W_a = [P^2/\rho c] \int_S R^2(\theta, \Omega) ds$ , где  $R$  — функция, определяющая ХН антенны;  $\theta$  и  $\Omega$  — текущие углы сферической системы координат (рис. 2.70);  $s$  — элемент поверхности сферы  $ds = r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\Omega$ .

Коэффициент концентрации в произвольном направлении

$$K_{\theta, \Omega} = [4\pi R^2(\theta, \Omega)] / \left[ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\Omega=0}^{2\pi} R^2(\theta, \Omega) \sin \theta \, d\theta \, d\Omega \right].$$

Осевой коэффициент концентрации

$$K = 4\pi / \left[ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\Omega=0}^{2\pi} R^2(\theta, \Omega) \sin \theta d\theta d\Omega \right]. \quad (2.13)$$

Если излучение осуществляется в полупространство, например, когда антенна находится в бесконечном плоском экране и экранирована также и с тыльной стороны, в выражении (2.12) — (2.13) следует добавить коэффициент 2.

Связь коэффициента концентрации с акустической мощностью и давлением определяется выражением  $K = (4\pi r^2 / \rho c) (P^2 / W_a) = 2,89 \cdot 10^{-3} (P^2 / W_a)$  или  $P = 345,5 \sqrt{W_a K} \approx 350 \sqrt{W_a K}$ .

Процесс вычисления коэффициента концентрации и мощности связан с интегрированием квадрата ХН по поверхности сферы и является во многих случаях трудно разрешимой задачей из-за сложности подынтегральных функций. При некоторых условиях возможно упрощение выражения (2.12). Если ХН обладает осевой симметрией, элемент площади может быть представлен в виде  $ds = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$ ,

и коэффициент концентрации будет  $K = 2 / \left( \int_0^{\pi} R^2(\theta) \sin \theta d\theta \right)$ .

Иногда оказывается возможным представить выражение, определяющее ХН, в виде функциональной зависимости с разделяющимися переменными:  $R(\theta, \Omega) = R(\theta) R(\Omega)$ . Такое представление справедливо в случае, когда формы планарных ХН, полученных от сечения объемной характеристики плоскостями под разными углами, подобны как по  $\theta$ , так и  $\Omega$ . Выражение для коэффициента концентрации в таком виде может быть проинтегрировано последовательно:  $K = 4\pi / \int_{\Omega=0}^{2\pi} R(\Omega) d\Omega \int_{\theta=0}^{\pi} R(\theta) \sin \theta d\theta$ .

В ряде случаев удается аппроксимировать функцию ХН легко поддающейся интегрированию, например, степенным косинусом. Тогда

$K = 2 / \left( \int_0^{\pi} \cos^n \theta \sin \theta d\theta \right)$  или  $K = - [2(n+1)] / \left( \cos^{n+1} \theta \Big|_0^{\pi} \right)$  для четных  $n$ , или  $K = [2(n+1)] / (\cos^{n+1} \theta \Big|_{\pi}^0)$  для нечетных  $n$ .

Напомним, что при излучении в полупространство выражения для коэффициента концентрации следует умножать на два.

Коэффициент концентрации для антенны с синфазными колебательными скоростями в апертуре можно найти, используя выражение  $K = (\pi r_c S^2 \mu^2) / (\lambda^2 r_s)$ , где  $r_s$  — собственное сопротивление излучения антенны;  $\mu = 1 + [r_{s oc} / (\rho c S)]$  — коэффициент дифракции;  $r_{s oc}$  — сопротивление излучения осциллирующего вибратора;  $S$  — площадь апертуры антенны. В случае низких частот (ненаправленное излучение)  $\mu = 1$ ,  $K = 1$  получается следующее выражение для сопротивления излучения:  $r_s = (\pi r_c S^2) / \lambda^2$ . В случае высоких частот при размерах апертуры в любом сечении  $D > 1,5\lambda$ ,  $\mu = 2$ , сопротивление излучения оказывается равным сопротивлению плоской волны:  $r_s = \rho c$ , а для коэффициента концентрации имеем широко известное выражение:  $(4\pi S) / \lambda^2$ . Это выражение можно использовать для расчета коэффи-



циента концентрации антенн, по апертурам которых распределения колебательных скоростей синфазные и равномерные по амплитуде.

Для определения коэффициента концентрации линейной антенны (отрезок прямой, окружность, эллипс, парабола) с равномерными амплитудным и синфазным распределениями колебательной скорости, а также цилиндрической антенны, ненаправленной в плоскости направляющей, при длине линии  $L$  или высоте цилиндра  $H$  большей  $1,5\lambda$ , можно воспользоваться формулой  $K = [2L(H)]/\lambda$ .

Коэффициент концентрации синфазной антенны с амплитудным распределением в апертуре определяется по формуле  $K = [(4\pi S)/\lambda^2] C$ , где  $C$  — коэффициент использования площади апертуры — отношение, показывающее, во сколько раз коэффициент концентрации у антенны с амплитудным распределением, отличным от равномерного, отличается от коэффициента концентрации антенны с равномерным амплитудным распределением при равенстве площадей апертур.

Приближенно коэффициент использования площади можно оценить отношением объемов, замкнутых между плоскостями равновеликих по площади апертур антенн (с неравномерным и равномерным амплитудными распределениями) и поверхностями, соответствующими функциям, определяющим взаимно нормированные амплитудные распределения. Аналогично можно найти коэффициент использования площади прямолинейной или цилиндрической ненаправленной в плоскости направляющей антенн с амплитудным распределением по высоте, отличным от равномерного (см. также табл. 2.2).

Коэффициент концентрации в полупространстве для дискретной плоской антенны из одинаковых секций с компенсацией и амплитудным распределением  $A$  (без учета взаимодействия составляющих ее элементов) можно найти по формуле

$$K = 8\pi \left\{ \int_{\Omega=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} A_{mn} \exp j [k(x_n \cos \Omega \sin \theta + y_m \sin \Omega \sin \theta) + k\Delta_{mn}] \left[ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} A_{mn} \exp j (k\Delta_{mn}) \right]^{-1} R_{c_{mn}} \right\}^2 \sin \theta d\theta d\Omega \right\}^{-1}, \quad (2.14)$$

где  $R_c$  — нормированные объемные ХН секций;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $x_n, y_m$  — текущие координаты положения центров суммируемых секций (рис. 2.71);  $A_{mn}, \Delta_{mn}$  — амплитуды и фазы возбуждения секций;  $\theta$  — текущий угол в плоскости, проходящей через главную ось антенны;  $\Omega$  — угол ориентации плоскости, в которой определяется ХН, относительно оси  $x$ . Для плоской прямоугольной антенны при длине  $D_a > \lambda$  и ширине  $D_m < \lambda$  имеем при излучении в пространство  $K = 2D_a/\lambda$  и при излучении в полупространство:  $K = 4D_a/\lambda$ .

Коэффициент концентрации плоской антенны с компенсацией в пределах углов поворота таких, когда стопроцентный боковой лепесток (уменьшенный в результате действия направленности секций) не превышает 20—30 %, можно рассчитать по приближенной формуле  $K = C(4\pi S/\lambda^2) \cos \beta_a \cos \beta_m$ , где  $C$  — коэффициент использования площади, обусловленный искусственным распределением;  $\beta_a, \beta_m$  — углы поворота основного лепестка ХН в азимутальной и угломестной

плоскостях. Коэффициенты  $\cos \beta_a$  и  $\cos \beta_m$  учитывают уменьшение проекции апертуры на плоскость, перпендикулярную направлению основного лепестка ХН. На рис. 2.71 показано относительное изменение коэффициента концентрации плоской антенны со сканированием. Кривые 1 и 2 получены в результате расчета по формуле (2.14).

Во многих случаях расчет коэффициента концентрации по известным формулам становится слишком трудоемким процессом из-за сложности функций, представляющих характеристики направленности антенны, в связи с необходимостью численного интегрирования при двух переменных. Расчет существенно упрощается, если пользоваться

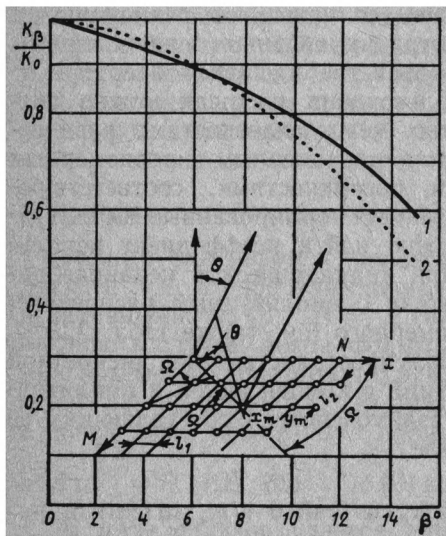


Рис. 2.71. Относительное изменение коэффициента концентрации плоской антенны со сканированием

приближенной формулой:  $1/K = 1/n (1/K_1 + 1/K_2 + 1/K_3 + \dots + 1/K_n)$ , где  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$  — парциальные значения коэффициента концентрации, полученные при расчете по ХН в плоскостях, проходящих через направление совпадающей с максимумом основного лепестка оси под равными углами  $\Omega$ . Результат расчета по этой формуле тем более точен, чем меньше различие между парциальными значениями  $K_n$ . Если  $K$  определяется по двум парциальным значениям, более точные результаты дает формула  $K = \sqrt{K_1 K_2}$ .

В случаях, когда оказывается невозможным аналитическое вычисление коэффициента концентрации даже по парциальным значениям, применяют способ графического его определения.

Для этой цели используют бланки (рис. 2.72) со специальной координатной сеткой. По оси абсцисс от центра в обе стороны отложены текущие углы характеристики направленности в секторе  $\pm 180^\circ$ . Длины обозначенных отрезков по оси абсцисс пропорциональны функции  $1 - \cos \theta$ , получающейся в результате решения интеграла  $\int_0^\theta \sin \theta d\theta$ . По оси ординат отложены нормированные значения ХН

при длинах обозначенных отрезков оси ординат, пропорциональных функции  $20 \lg 1/R(\theta)$ . Для удобства построения боковых лепестков с малым уровнем, меньшим, чем 10 %, по оси ординат нанесен увеличенный в 10 раз масштаб для значений ХН. По оси абсцисс масштаб растянут в пределах углов  $\pm 4^\circ$  в 200 раз, от 4 до  $10^\circ$  — в 10 раз и от 10 до  $20^\circ$  — в 5 раз. Это сделано с целью облегчения построения и расчета при остронаправленных характеристиках. В случае необходи-

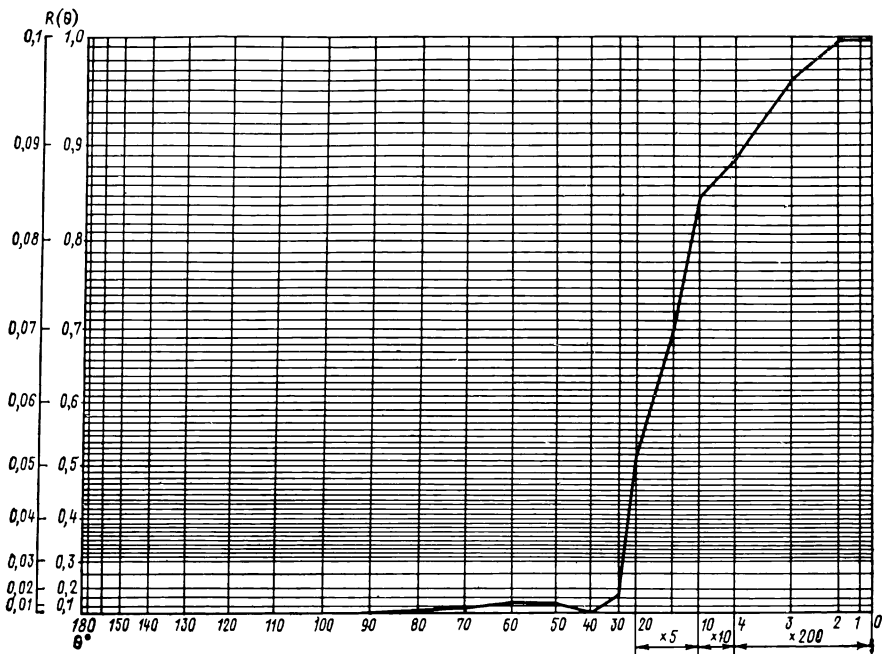


Рис. 2.72. Бланк для определения коэффициента концентрации. При расчете добавить область положительных углов до  $+180^\circ$

мости бланк с координатной сеткой может быть видоизменен, например, можно исключить отмеченное увеличение масштаба, если предполагается определять коэффициент концентрации слабонаправленных антенн.

Процесс вычисления коэффициента концентрации заключается в нанесении ХН на бланк и вычислении площади, располагающейся между осью абсцисс и построенной кривой. При вычислении площади, ограниченной ХН, значения, полученные для углов  $\pm 20^\circ$ , необходимо уменьшить в соответствующее растянутому масштабу количество раз. Затем берется отношение площади всего бланка к найденной. В случае, если ХН обладает круговой симметрией, полученное отношение и есть искомый коэффициент концентрации. Если ХН несимметрична, вычисления проводят с использованием нескольких плоскостных характеристик (но не менее двух). Чем больше сечений ХН, тем выше точность. Коэффициент концентрации получают путем

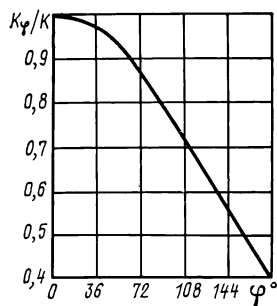


Рис. 2.73. Изменение нормированного к максимальному коэффициенту концентрации прямоугольной антенны при наличии квадратичной фазовой ошибки в апертуре

взятия среднего геометрического из полученных значений. Способ одинаково пригоден для вычисления концентрации по ХН, полученным расчетным или экспериментальным путями. Заметим, что при вычислении коэффициента концентрации антенн некоторых типов, например, ненаправленного цилиндра с круговой симметрией, его ХН следует наносить на бланк таким образом, чтобы максимум основного лепестка располагался по направлению  $\theta = 90^\circ$ .

На рис. 2.73 приведен график изменения нормированного к максимальному коэффициенту концентрации для плоской антенны в зависимости от величины квадратичной фазовой ошибки в апертуре.

### 2.9.2. Сопротивление излучения

Сопротивление излучения является мерой, характеризующей способность антенны передавать в среду (принимать извне) энергию. Полное сопротивление излучения можно определить как коэффициент

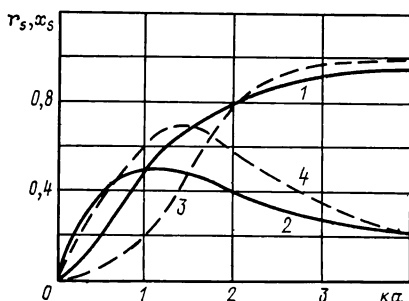


Рис. 2.74. Изменение активного 1, 3 и реактивного 2, 4 нормированных сопротивлений излучения пульсирующего (сплошная линия) и осциллирующего (пунктир) сферических вибраторов в зависимости от волновых размеров

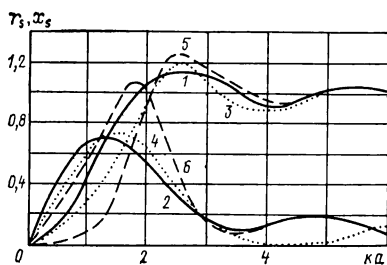


Рис. 2.75. Изменение активного 1, 3, 5 и реактивного 2, 4, 6 нормированных сопротивлений излучения круглого поршневого вибратора в зависимости от волновых размеров

— — — — — односторонний поршень в плоском бесконечном жестком экране; — — — — односторонний поршень без экрана; ... осциллирующий поршень без экрана

пропорциональности между силой  $q$  реакции среды на колебательные движения антенны и колебательной скоростью  $v$  ее поверхности:  $z_s = q/v$ .

Для удобства анализа энергетических свойств антенны обычно находят активную  $r_s$  (действительную) и реактивную  $x_s$  (мнимую) части комплексного  $z_s$  сопротивления излучения. Нижеприведенные формулы характеризуют сопротивление излучения пульсирующего сферического вибратора:  $z_s = \rho c S \{ (ka)^2 / [1 + (ka)^2] + j (ka) / [1 + (ka)^2] \}$ ;  $r_s = \rho c S (ka)^2 / [1 + (ka)^2]$ ;  $x_s = \rho c S [ka / [1 + (ka)^2]]$ . Обе компоненты сопротивления излучения зависят от сопротивления среды  $\rho c$ , поверхности вибратора  $S$  и соотношения его размеров (радиуса  $a$ ) с длиной волны,  $ka$ .

В антенной технике принято нормировать сопротивление излучения антенн к сопротивлению плоской волны  $\rho c S$ . На рис. 2.74 пред-

ставлены графики изменения нормированного сопротивления излучения сферического вибратора в зависимости от его волновых размеров. В дальнейшем под символами  $z_s$ ,  $r_s$ ,  $x_s$  будем понимать нормированные импедансы.

Видно, что при малых размерах вибратора активное сопротивление (кривая 1) мало, а реактивное (кривая 2) — велико. Это означает, что мощность вибратором почти не излучается. Энергия, перешедшая в среду, возвращается обратно вибратору. С увеличением  $ka$  активное сопротивление стремится к сопротивлению плоской волны  $\rho c S$ , а реактивное уменьшается, вибратор излучает эффективно. Вспомним, что активное сопротивление излучения является коэффициентом пропорциональности между излучаемой акустической мощностью и квадратом колебательной скорости поверхности антенны:  $W_a = r_s v^2$ . Кривые 3 и 4 характеризуют сопротивление излучения осциллирующего шара (диполя), колеблющегося так, что его центр совершает периодические смещения вдоль оси колебаний. Видно, что эффективность диполя существенно ниже в области низких частот. Таким образом, сопоставляя нормированные сопротивления излучения, оказывается возможным сравнивать энергетическую эффективность различных вибраторов.

Мы рассмотрели относительно простой пример определения сопротивления излучения. В большинстве случаев поля, формируемые антеннами, не могут быть представлены простыми зависимостями, и процесс вычисления сопротивлений излучения становится математически трудной задачей, не разрешимой без применения вычислительных машин. Так, например, при нахождении сопротивления излучения  $z_s = q/(\rho c S v)$  плоского поршня в бесконечном жестком экране приходится вычислять четырехкратный интеграл вида  $q = PS = \rho \int_S (\partial \Phi / \partial t) dS$ , где  $\Phi$  — потенциал поля антенны, имеющий в частном случае вид плоского поршня  $\Phi = A \int_S (e^{-ikz}/r) ds$ . Ре-

шение интеграла, полученное для случая круглого поршня, приводит к следующему результату:  $z_s = [1 - \mathcal{Y}_1(2ka)/ka] + j [S_1(ka)/ka]$ , где  $\mathcal{Y}_1$  и  $S_1$  — функции Бесселя и Струве первых порядков;  $a$  — радиус поршня (рис. 2.75).

Еще более сложным оказывается вычисление сопротивлений излучения круглых плоских поршней без экрана. Здесь не будем останавливаться на деталях, связанных с их расчетом. Из рис. 2.75, 2.76 видно, что при достаточно больших волновых размерах излучающей (приемной) поверхности вибратора (больше длины волны) независимо от его формы активное сопротивление излучения близко к сопротивлению плоской волны  $\rho c S$ , а реактивное — мало.

Для ненаправленной в плоскости направляющей цилиндрической антенны при диаметре  $D \gg \lambda$  имеем сопротивление излучения в следующем виде:  $r_s = \rho c S = \rho c \pi H D$ , а при  $D \ll \lambda$ :  $r_s = (\pi^3 \rho c H D^2) / 2\lambda$  [32]. Уточнить сопротивления цилиндра (рис. 2.77) конечной длины можно с помощью выражений:  $r_s = 0,9 r_{s\infty}$  при  $H \geq 0,8\lambda$ ;  $r_s = (\pi S / \lambda^2) (1 - H^2 / \lambda^2)$  — без экрана при  $H \leq 0,6\lambda$ ;  $r_s = (\pi^2 / 2) (D H / \lambda^2) \times$

$\times (1 - H^2/\lambda^2)$  — с экраном в секторе  $180^\circ$ , при  $H \leq 0,6\lambda$ ;  $r_s = \pi S/\lambda^2$  при  $H \leq 0,3\lambda$ .

Таким образом, пользуясь представленными зависимостями и соотношениями, можно с достаточной для инженерных расчетов степенью точности находить собственное сопротивление излучения сплошных синфазных антенн, в том числе и отличных от рассмотренных типов.

Заметим, что сопротивление излучения конической рефлекторной антенны равно сопротивлению излучения облучателя, поскольку в такой антенне между рефлектором и облучателем не возникает стоячих волн, обусловливаемых взаимными отражениями.

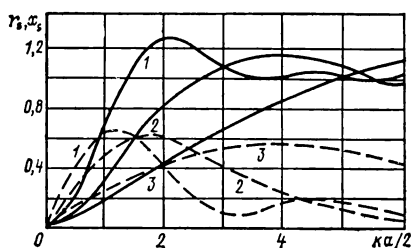


Рис. 2.76. Изменение активного (—) и реактивного (---) нормированных сопротивлений излучения прямоугольного поршневого вибратора в зависимости от волновых размеров его сторон  $a$  и  $h$

1 —  $h = a$ ; 2 —  $h = 0,5 a$ ; 3 —  $h = 0,25 a$

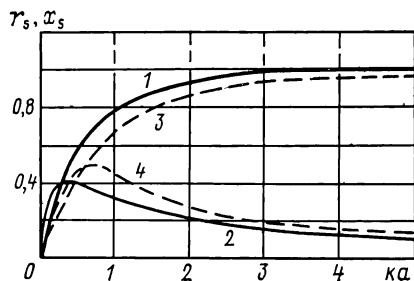


Рис. 2.77. Изменение активного 1, 3 и реактивного 2, 4 нормированных сопротивлений излучения бесконечно протяженного цилиндра в зависимости от его волнового радиуса

— без экрана  
--- экран в секторе  $180^\circ$

Расчетные выражения усложняются, если колебания участков поверхности сплошной антенны (преобразователя) несинфазны или неравномерны по амплитуде:  $z_s = [1/(\rho c v v^*)] \int_S P(r) v^*(r) ds$ , где  $P(r)$  — звуковое давление, развиваемое антенной;  $v(r)$  — распределение нормальной колебательной скорости по излучающей поверхности антенны;  $v$  — колебательная скорость точки приведения; \* — символ, означающий комплексно сопряженную величину. При  $v^* = \text{const}$  формула приводится к виду  $z_s = [1/(\rho c S v)] \int_S P(r) ds$ , где  $r$  — радиус-вектор точки наблюдения.

Несколько сложнее обстоит дело с сопротивлением у многоэлементных антенн, особенно с компенсированными характеристиками направленности, из-за возникновения взаимодействия между преобразователями, составляющими антенну. В результате взаимодействия отдельные преобразователи в зависимости от их положения в антенне, возбуждения, размеров и добротности могут оказаться по-разному нагруженными, причем их импедансы и эффективность будут меняться с изменением характера возбуждения, так что по антенне возникнет нежелательное амплитудно-фазовое распределение. Собственные сопротивления излучения преобразователей также могут изменяться

и привести к рассогласованию с электронными трактами — генераторами и усилителями. Взаимодействие происходит через поле, возникающее в среде. При этом реакция поля на поверхность преобразователей складывается из реакции собственного поля и реакции поля соседних излучателей; аналогично и в приеме — из реакции поля падающей волны и полей соседних преобразователей, переизлучающих часть падающей на них энергии.

В общем виде выражение для взаимного сопротивления излучения преобразователей с индексами  $n$  и  $m$  может быть представлено в виде

$$z_{s_{nm}} = \left[ \frac{1}{\rho c S v_n v_m^*} \right] \int_{S_m} P_n(r_m) v_m^* \times (r_m) ds_m.$$

В случае  $n = m$  это выражение совпадает с выражением, определяющим собственное сопротивление излучения.

Из-за сложности задачи не будем вдаваться в подробности, связанные непосредственно с вычислением взаимных сопротивлений многоэлементных антенн [19, 22, 43, 44, 55, 59—62].

На рис. 2.78 приведены графики изменения взаимных сопротивлений излучения преобразователей разных размеров и формы в жестком плоском экране в зависимости от расстояния между их центрами.

Кривые 1 и 2 характеризуют взаимное сопротивление излучения круглых плоских поршней диаметром  $d = 0,32\lambda$  ( $ka = 1$ ); кривые 3 и 4 — квадратных поршней со стороной  $h = 0,32\lambda$ , взаимно расположенных таким образом, что линия  $l$ , соединяющая их центры, перпендикулярна сторонам обоих преобразователей; кривая 5 — квадратных поршней со стороной  $h = 0,16\lambda$  при аналогичном взаимном расположении.

Взаимное сопротивление излучения убывает с увеличением размеров поршней и расстояний между ними и практически с ним можно не считаться, когда расстояние и размеры поршней близки к длине волны; в этом случае связь между преобразователями мала. Действие активной связи между преобразователями таково, что возможно возникновение существенного перераспределения нагрузки по участкам антенны, что, естественно, является нежелательным эффектом. Реактивная связь может повлечь изменение резонансных частот преобразователей. Поэтому проектировать антенны надо таким образом, чтобы влияние связи было минимальным, для чего следует располагать слабонаправленные преобразователи на расстояниях  $\geq 0,5\lambda$ . Отметим еще, что изменение взаимной ориентации квадратных поршней

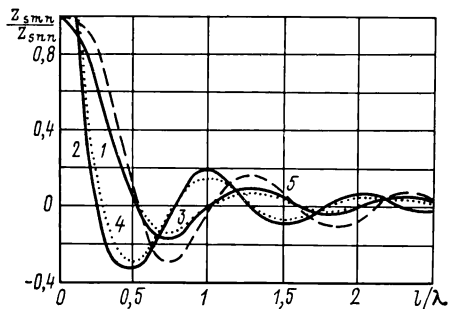


Рис. 2.78. Изменение взаимных, нормированных к собственным, активных 1, 3, 5 и реактивных 2, 4, сопротивлений излучения антенны из двух слабонаправленных преобразователей в зависимости от волнового расстояния между ними

от выбранной в нашем случае (вплоть до такой, когда линия, соединяющая их центры, становится диагональю для каждого квадрата) увеличивает взаимное сопротивление излучения.

При расположении преобразователей в жестких цилиндрическом или сферическом экранах взаимные сопротивления излучения совпадают с таковыми в случае наличия плоского экрана в пределах до  $l = 1,5\lambda$ . С дальнейшим ростом  $l/\lambda$  взаимные сопротивления преобразователей, расположенных на сфере или по направляющей цилиндра, в  $1,5 \div 2$  раза меньше, чем преобразователей, расположенных в плоском экране или по образующей цилиндра. Уменьшение взаимных сопротивлений излучения преобразователей, рабочие поверхности которых совпадают с поверхностью выпуклых экранов, объясняется уменьшением связи по полю из-за разворота осей характеристик направленности в противоположных направлениях. Отмеченный эффект проявляется в случае, если радиус кривизны экрана лежит в пределах примерно  $4 \div 12\lambda$ , т. е. не слишком мал, так что оказывается возможным пренебречь дифракцией, и не слишком велик, чтобы экран не был близок к плоскому на протяжении нескольких длин волн.

### Глава 3

---

## ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### § 3.1. ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ

В гидроакустической технике наибольшее распространение из-за высокой эффективности и конструктивных удобств получили пьезоэлектрические преобразователи.

Принцип работы пьезоэлектрических преобразователей основан на использовании свойств элементов, изготовленных из пьезоэлектрически активных веществ, изменять свои размеры под воздействием электрической составляющей электромагнитного поля. Изменение размеров таких элементов при действии внешних сил приводит к возникновению электромагнитного поля.

Известно большое количество веществ и материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, однако не все пригодны для изготовления гидроакустических преобразователей. Одни, например, кварц, — из-за малой величины пьезоэффекта, другие, хотя и обладающие большим пьезоэффектом, например сегнетова соль, — из-за хрупкости, гигроскопичности и ограниченного температурного диапазона.

Наибольшее распространение в гидроакустике получили преобразователи, изготовленные из пьезокерамики, — материала, обладающего высоким пьезоэлектрическим эффектом, достаточно большой



прочностью и допускающего прессование деталей практически любой формы.

Геометрически пьезопреобразователи обычно представляют собой стержни, пластины, цилиндры, сферы. Особенностью пьезоэлектрических преобразователей является наличие токоведущих электродов, к которым прикладывается напряжение от возбуждающего генератора. В приемном режиме с электродов снимаются для подачи к усилительному тракту электрические заряды, возникающие от воздействия звукового давления.

Пьезоэлектрические материалы состоят из множества кристаллических ячеек. Каждая элементарная ячейка пьезоэлектриков обладает электрическим моментом — является диполем. Эти вещества самопроизвольно поляризованы. Однако в свободном состоянии ориентация электрических моментов произвольна. Ориентация моментов в одном направлении приводит к образованию однородно поляризованных областей — доменов.

Поляризация пьезоэлектрика может быть природной (у кварца) или вызвана воздействием постоянного напряжения большой величины (у пьезокерамики). Поляризация сохраняется и после прекращения действия поляризирующего напряжения.

Пьезоэлектрические вещества обладают анизотропией свойств. Пьезоэлектрические свойства описываются с помощью диэлектрических и упругих постоянных и пьезоэлектрических модулей. В общем случае эти постоянные представляют в виде матрицы, содержащей до 45 коэффициентов: 21 постоянную гибкости, 6 диэлектрических проницаемостей, 18 пьезомодулей. Пьезомодули — постоянные, определяющие величину деформации, возникающей в свободном кристалле, в зависимости от величины приложенного электрического поля.

Большинство пьезоактивных материалов может быть охарактеризовано существенно меньшим количеством постоянных. Пьезокерамике, например, присуща радиальная поляризация, так что для ее характеристики достаточно знать три пьезомодуля: продольный  $d_{33}$  — характеризует эффективность колебаний в направлении, параллельном электрическому полю; поперечный  $d_{31}$  — в направлениях, перпендикулярных направлению поля; сдвиговой  $d_{15}$ .

Детали для пьезокерамических преобразователей изготавливаются путем обжига или литья соответствующего материала под давлением. После обжига размеры деталей доводят до заданных. Производят вжигание в необходимые поверхности металлических электродов. Затем пьезоэлементы подвергают поляризации в постоянном электрическом поле. Из полученных таким образом пьезоэлементов собирают пьезокерамические преобразователи.

Пьезоэффект у пьезоактивных материалов зависит от температуры. Он исчезает с превышением определенной температурной границы, называемой точкой Кюри, при которой происходит разориентация осей доменов. У большинства материалов пьезосвойства восстанавливаются с понижением температуры, для восстановления пьезоэффекта у пьезокерамики необходима повторная поляризация. Ха-

Таблица 3.1. Параметры

Марка материала	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon/\epsilon_0$	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ , не более		Удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_v$ , Ом·м, при $373 \pm 5^\circ\text{C}$ , не менее	Электрическая прочность $E_{пр}$ , $10^{-6}$ , В/м, не менее	Температура точки Кюри $T_K$ , $^\circ\text{C}$ , не менее	Коэффициент электромагнитной связи $K_p$ , радиальный, не менее
		В слабых полях: при $E=25$ кВ/м	В сильных полях при $E=300$ кВ/м				
ТБ-1	$1500 \pm 300$	0,0260	—	$1 \cdot 10^6$	3,0	383 (110)	0,20
ЦТС-19	$1525 \pm 325$	0,0350	—	$1 \cdot 10^8$	3,0	563 (290)	0,40
ЦТСНВ-1	$2250 \pm 560$	0,0190	0,300	$1 \cdot 10^8$	2,9	513 (240)	0,45
ТБК-3	$1200 \pm 200$	0,0200	0,040	$1 \cdot 10^7$	3,0	368 (95)	0,20
ЦТС-23	$1075 \pm 225$	0,0075	0,040	$5 \cdot 10^8$	3,0	548 (275)	0,43
ЦТС-24	$1075 \pm 225$	0,0075	0,040	$1 \cdot 10^8$	3,0	543 (270)	0,45
НБС-1	$1600 \pm 300$	0,0200	0,120	$1 \cdot 10^9$	3,5	518 (245)	0,28
ЦТСБ-3	$2300 \pm 500$	0,0120	0,035	$1 \cdot 10^8$	3,0	543 (180)	0,45
ЦТСС <sub>r</sub> -1	$1150 \pm 150$	0,0050	0,010	$5 \cdot 10^8$	—	533 (260)	0,43

Примечание.  $\epsilon$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0 = (4 \cdot 9 \cdot 10^9)^{-1}$

характеристика пьезоэлектрических и упругих свойств различных материалов [10, 17] дана в табл. 3.1.

Для удобства расчета в табл. 3.2 представлены дополнительные (средние значения производных от установленных стандартом) параметры.

Пьезокерамические материалы подразделяются на функциональные группы. Сегнетомягкие материалы: ТБ-1 (титанат бария), ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца), ЦТСНВ-1 (цирконат-титанат свинца, натрия, висмута) предназначены для изготовления высокочувствительных преобразователей, работающих в режимах приема и (или) излучения при ограниченных электрических полях. Сегнетожесткие материалы: ТБК-3 (титанат бария, кальция, кобальта), ЦТС-23 и 24 (цирконат-титанат свинца), НБС-1 (ниобат бария-свинца), ЦТСБ-3 (цирконат-титанат бария-свинца), ЦТСС-1 (цирконат-титанат свинца-стронция) предназначены для преобразователей, работающих в ре-

**пьезоэлектрических материалов**

Пьезоэлектрические модули $d_{ik} \cdot 10^{12}$ Кл/Н, не менее		Относительное отклонение частоты в интервале температур, не более		Модуль Юнга $Y_{31} \cdot 10^{-11}$ , Па	Механическая добротность $Q_M$ , не менее	Скорость звука $c_l \cdot 10^{-3}$ , м/с	Коэффициент Пуассона $\sigma$	Предел механической прочности при статическом растяжении $\sigma_{раст} \cdot 10^{-9}$ Па, не менее	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup> , не менее
$d_{31}$	$d_{33}$	от 263 до 323 К (от -10 до 50 °С)	от 213 до 358 К (от -66 до 85 °С)						
		45,0	100,0	0,90—1,10	100	4,30—4,90	—	1860	5,30
100	200	100,0	200,0	0,55—0,85	50	3,00—3,60	—	—	7,45
160	490	—	—	0,57—0,71	70	2,85—3,05	0,31	1670	7,30
51	113	43,3	83,3	1,09—1,30	300	4,50—5,00	—	1860	5,30
75	150	100,0	200,0	0,65—0,85	200	3,00—3,35	—	1860	7,40
—	—	100,0	200,0	0,65—0,85	200	3,00—3,35	—	1860	7,40
		66,6	165,5	0,70—0,95	150	3,60—4,30	—	2940	5,60
160	400	125,0	320,0	0,70—0,90	200	3,37—3,61	0,3	1960	7,20
—	—	75,0	180,0	0,70—0,90	500	3,50	—	1900	7,30

электрическая постоянная вакуума, Ф/м.

жиме приема и (или) излучения в условиях воздействия сильных электрических и (или) механических напряжений.

При проектировании преобразователей целесообразно использовать наиболее эффективный пьезоматериал. Сопоставить эффективность пьезоматериалов можно, используя параметры эффективности. Для режима излучения это произведение пьезомодуля на модуль упругости  $d_{ik}Y_{ik}$ , которому пропорциональна излучаемая преобразователем акустическая мощность при заданном электрическом напряжении возбуждения. Соотношения  $d_{ik}Y_{ik} \times (\epsilon c)^{-1/2}$  и  $d_{ik}\epsilon^{-1/2}$  могут служить мерой эффективности преобразователя при работе его в режиме приема. Этим величинам пропорциональна чувствительность на резонансе в режиме приема и удельная чувствительность вне резонанса.

Расчет параметров преобразователей обычно осуществляется с помощью эквивалентных электромеханических схем, построение кото-

Таблица 3.2. Параметры пьезоэлектрических материалов  
(средние значения)

Марка материала	$\gamma_{33}^E \cdot 10^{-11}$ , Па	$\gamma_{33}^D \cdot 10^{-11}$ , Па	$\epsilon_3^E \cdot 10^{-3}$ , м/с	$\epsilon_1^D \cdot 10^{-3}$ , м/с	$\epsilon_3^D \cdot 10^{-3}$ , м/с	$b_{\text{раз}}$	$b_{\text{раз}}$	Коэффициент температурного расширения $10^6/^\circ\text{C}$
ТБ-1	—	1,12	—	4,41	4,50	0,15	0,30	—
ЦТС-19	0,60	1,32	3,00	3,21	4,08	0,26	0,44	—
ЦТСНВ-1	0,49	0,98	2,60	3,08	3,68	0,34	0,72	5
ТБК-3	1,05	1,36	4,40	4,75	5,01	0,17	0,37	7
ЦТС-23	0,67	1,02	3,00	3,26	3,70	0,20	0,47	—
НБС-1	—	1,36	—	4,52	4,90	0,17	0,34	—
ЦТБС-3	0,75	1,22	3,22	3,56	4,12	0,32	0,65	3, 4
ЦТСС <sub>T</sub> -1	0,79	1,13	3,30	3,62	3,94	0,26	0,55	—

рых основано на результатах анализа уравнений движения колебательной системы с учетом граничных условий и уравнений, описывающих пьезоэлектрические и диэлектрические свойства материала. Приводимые ниже эквивалентные схемы и выражения для расчета построены на принципах, изложенных в работах [17, 49] и в трудах В. Н. Тюлина, в предположении одномерного приближения колебательных движений (каждое поперечное сечение при перемещении сохраняет свою форму). Расчетные соотношения при таком допущении дают приемлемые результаты, когда резонансный размер стержня превышает размеры в поперечном сечении минимум в 2 раза. Высота цилиндрического преобразователя, предназначенного для работы на радиальной колебательной моде, должна быть меньше, как минимум в 2 раза резонансного размера для стержня, а толщина стенки цилиндра составлять не более четверти среднего диаметра. При несоблюдении таких соотношений размеров возможно возникновение связанных колебательных движений в различных направлениях, причем подчеркивание нежелательных мод может обуславливаться анизотропией свойств пьезоматериалов в различных направлениях: пьезомодулей, скоростей, упругих констант. При соблюдении рекомендуемых условий скорость распространения звука в кольце можно

принимать равной скорости звука в одномерном стержне. Если прочие (нерезонансные) размеры преобразователя оказываются больше длины волны (в материале), скорость распространения звука в нем следует определять как в безграничной среде, для чего можно использовать соотношение  $c_i = \{Y_{ik} (1-\sigma) [(1+\sigma) (1-2\sigma) \rho]^{-1}\}^{1/2}$ , где  $\sigma$  — коэффициент Пуассона;  $Y_{ik}$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность.

В одномерном приближении это выражение упрощается:  $c_i = (Y_{ik} \rho^{-1})^{1/2}$ .

Для преобразователей пластинчатого типа, размер которых в направлении полезного распространения колебаний меньше, чем в перпендикулярном ему (в том числе и для цилиндра с большой высотой), можно принять выражение:  $c_i = \{Y_{ik} [(1-\sigma^2) \rho]^{-1}\}^{1/2}$ .

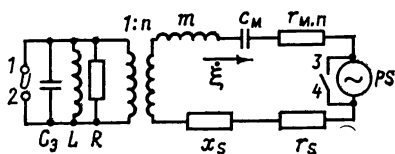


Рис. 3.1. Эквивалентная схема цилиндрического преобразователя

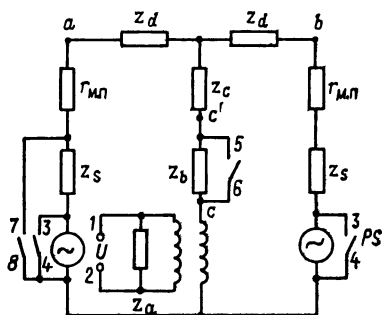


Рис. 3.2. Эквивалентная схема стержневого преобразователя

**Эквивалентные схемы.** Ниже приведены общие виды эквивалентных схем преобразователей. На рис. 3.1 изображена эквивалентная схема цилиндрического преобразователя. Левая (электрическая) и правая (механическая) части связаны через электромеханический трансформатор с коэффициентом электромеханической трансформации  $n$ . В режиме излучения на клеммы 1—2 подается электрическое напряжение возбуждения  $U$ , вызывающее колебательные движения цилиндра. Клеммы 3—4 должны быть замкнуты. В режиме приема к клеммам 3—4 подключается генератор механической силы  $F$ , возникающей от воздействия звукового давления  $P$  извне,  $F = PS$ , а к клеммам 1—2 — приемный усилитель. Символы  $C$  и  $R$  означают соответственно электрические емкость и сопротивление, с которыми можно суммировать величины дополнительных емкостей, индуктивностей и резисторов, предназначенных в случае необходимости для цепей согласования преобразователя с электрическим трактом. В правой части обозначают  $m$ ,  $C_m$ ,  $r_{m,п}$ ,  $r_s$ ,  $\chi_s$  — массу, гибкость, сопротивление механических потерь, активную и реактивную составляющие сопротивления излучения;  $\xi$  — ток, эквивалентный колебательной скорости. Произведения  $\xi^2 r_{m,п}$  и  $\xi^2 r_s$  определяют механическую (расходуемую на потери) и полезную (излучаемую или принимаемую) акустическую мощности.

Как видно, из эквивалентной схемы могут быть определены все необходимые электроакустические параметры преобразователя: частотные характеристики излучаемой мощности, давления, чувствитель-

ности, проводимости. Эквивалентные схемы стержневых преобразователей (рис. 3.2) более сложны вследствие незамкнутости колебательных систем и представления их в виде линий с распределенными параметрами: Т-образные звенья  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . (Обозначения используемых в схемах этой главы параметров приведены ниже).

*Электрические величины:*  $\varepsilon$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная вакуума, Ф/м,  $\text{А}^2\text{с}^4/\text{м}^3\text{кг}$ ;  $C$  — электрическая емкость, Ф,  $\text{А}^2\text{с}^4/\text{м}^2\text{кг}$ ;  $Z_a$ ,  $R$ ,  $X_c$ ,  $R_p$  — полное, активное, емкостное, реактивное сопротивление, сопротивление электрических потерь, Ом,  $\text{м}^2\text{кг}/\text{А}^2\text{с}^3$ ;  $W_3$  — потребляемая электрическая мощность, Вт,  $\text{м}^2\text{кг}/\text{с}^3$ ;  $U$  — напряжение возбуждения, В,  $\text{м}^2\text{кг}/\text{А}\text{с}^3$ ;  $E$  — напряженность электрического поля, В/м,  $\text{м}\text{кг}/\text{А}\text{с}^3$ ;  $D$  — электрическая индукция.

*Механические величины:*  $K$  — коэффициент концентрации;  $P$  — звуковое давление, Па,  $\text{кг}/\text{м}\text{с}^2$ ;  $\xi$  — колебательная скорость, м/с;  $S$  — площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;  $F = PS$  — сила, Н,  $\text{кг}\text{м}/\text{с}^2$ ;  $T$  — механическое напряжение, Па,  $\text{кг}/\text{м}\text{с}^2$ ;  $W_a$  — акустическая мощность, Вт,  $\text{м}^2\text{кг}/\text{с}^3$ ;  $W_m$  — механическая мощность, Вт,  $\text{м}^2\text{кг}/\text{с}^3$ ;  $c$  — скорость звука, м/с;  $\rho$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho c$  — акустическое сопротивление,  $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ ;  $Q$  — механическая добротность;  $Y$  — модуль Юнга,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ,  $\text{кг}/\text{м}\text{с}^2$ ;  $m$  — масса, кг;  $m_3$  — эквивалентная масса, кг;  $c_3$  — эквивалентная гибкость,  $\text{с}^2/\text{кг}$ ;  $\eta_{ам}$  — акустико-механический коэффициент полезного действия принимается равным 0,7—0,8 для преобразователей с малыми потерями (конструкция с воздушным заполнением при высококачественной развязке); 0,5—0,6 — для конструкций, заполненных маслом, при наличии демпфирования в узлах крепления;  $z$ ,  $r$ ,  $x$ ,  $r_{м.п}$  — полное, активное, реактивное сопротивление и сопротивление механических потерь,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $r_s$ ,  $x_s$  — активное и реактивное сопротивление излучения,  $\text{кг}/\text{с}$ .

*Электромеханические величины:*  $n$  — коэффициент электромеханической трансформации, Кл/м,  $\text{Ас}/\text{м}$ ;  $k$  — коэффициент электромеханической связи;  $d$  — пьезоэлектрический модуль, К л/Н,  $\text{А}\cdot\text{с}^3/\text{м}\cdot\text{кг}$ ;  $\gamma$  — чувствительность, В/Па,  $\text{м}^3/\text{А}\cdot\text{с}$ ;  $\eta_{3а}$  — электроакустический коэффициент полезного действия.

*Общие величины и символы:*  $f_p$  — частота механического резонанса, Гц;  $f_a$  — частота электромеханического резонанса, Гц;  $k$  — волновое число 1/м;  $\omega = 2\pi f$ ;  $v$ ,  $s$ ,  $p$ ,  $t$ ,  $n$  — символы, обозначающие принадлежность параметра воде, излучению, передней, тыльной и просто накладке; отсутствие символа означает принадлежность параметра пьезокерамике;

$$z_b = jn^2/\omega C; z_c = -j\rho c S/\sin kl; z_d = j\rho c S \operatorname{tg} v kl/2;$$

$$z_e = j\rho_{пс} S_n \operatorname{tg} l/\text{м}; k_{nl}/2, z_f = -j\rho_{пс} S_n/\sin v k_{nl},$$

$$z_d = j\rho_{тс} S_t \operatorname{tg} l/\text{м}; k_{tl}/2, z_h = -j\rho_{тс} S_t/\sin v k_{tl},$$

$$z_i = j\rho_{тс} S_t \operatorname{tg} l/\text{м}; k_{tl}, z_k = -j2\rho c S \operatorname{ctg} v kl/2,$$

где  $kl$  — волновые колебательные размеры.

Перечисленные выше сопротивления могут составлять как параллельно, так и последовательно включенную группу, только в последнем случае необходимо произвести соответствующий пересчет величин импедансов из параллельного соединения в последовательное.

Напомним порядок пересчета сопротивлений из параллельного соединения в последовательное и обратно (рис. 3.3). Исходные условия: сопротивление обоих двухполюсников, напряжения на клеммах 1—2 и 3—4 и токи в неразветвленных цепях равны:

$$AB/(A+B) = a+b, \quad (3.1)$$

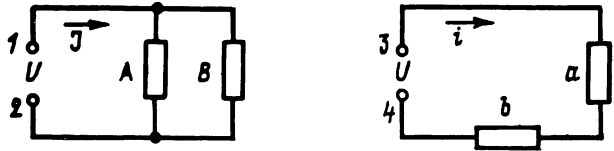
где  $U = u$ ;  $\mathcal{I} = i$ . Мощности, выделяемые в сопротивлениях  $A$  и  $a$ , а также  $B$  и  $b$ , должны сохраняться. Поэтому

$$(U^2/A)(B/U^2) = i^2 a/i^2 b. \quad (3.2)$$

Из (3.2) находим  $a = b(B/A)$  и после подстановки в (3.1) определяем:  $a = AB^2/(A+B)^2$ ;  $b = A^2B/(A+B)^2$ . Аналогично

$$A = (a+b)^2/a; \quad B = (a+b)^2/b. \quad (3.3)$$

Рис. 3.3. К пояснению пересчета сопротивлений из параллельного соединения в последовательное



Схемы, изображенные на рис. 3.4, характеризуют соответственно стержни: односторонний, излучение (прием) в одну сторону, с одной накладкой, двусторонний с двумя накладками на противоположных концах и односторонний с двумя накладками при условии замыкания контактов 7—8 (это касается и рис. 3.2) и замене  $z_d$  на  $z_i$ . Наличие накладок учитывается введением дополнительных T-образных звеньев  $a-b-c$  (символы «п» и «т» означают принадлежность передней и тыльной накладке). Если излучение (прием) одной стороной отсутствует, соответствующее сопротивление нагрузки приравнивается нулю. Это случай полного акустического экранирования, аналогичного нагрузке на вакуум. Если конец стержня жестко закрепляется, соответствующие клеммы, к которым подключается нагрузка, должны быть разомкнуты. Все другие варианты нагрузок, естественно, лежат между 0 и  $\infty$ . Схема, изображенная на рис. 3.5,— пример учета связи двух преобразователей. Из схемы, показанной на рис. 3.6, являющейся общим электрическим аналогом схем, приведенных выше, следует

$$U = \xi \left\{ z_a + \frac{z_a z_b}{z_0} + z_b + \left[ \frac{z_a}{z_r} + \frac{z_a(z_b + z_r)}{z_0 z_r} + \frac{z_b + z_r}{z_r} \right] (z_d + z_m) \right\}.$$

Если антенна состоит из идентичных преобразователей, то для каждого из них

$$U = \xi \left( z_a + \frac{z_a z_b}{z_0} + z_b \right) + \left[ \frac{z_a}{z_r} + \frac{z_a(z_b + z_r)}{z_0 z_r} + \frac{z_b + z_r}{z_r} \right] \times \\ \times \left( z_d \xi_N + \sum_{n=1}^N z_{nm} \xi_n \right).$$

В результате получается система из  $N$  уравнений вида  $F = A\xi + B \sum_{n=1}^N z_{nm} \xi_n$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$





жения:  $z_a = [z_1(z_1 + z_2)]/z_2$ ;  $m = (z_1 + z_2)/z_2$ . При  $z_1 = z_2 = z$ :  $z_a = z_b = 2z$  и  $m = 2$ .

Таким образом, схема, изображенная на рис. 3.2, может быть последовательно приведена к виду, показанному на рис. 3.8.

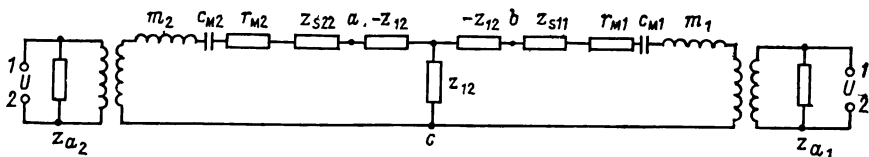


Рис. 3.5. Эквивалентная схема двух стержневых преобразователей с учетом их взаимодействия через среду

Продолжим разбор возможных вариантов упрощения эквивалентных схем. В области частот, ниже резонансной в 5 раз и более,  $kl/2$  мало, так что возможна замена  $\text{tg } kl/2 \approx kl/2$ . Тогда в схеме, изобра-

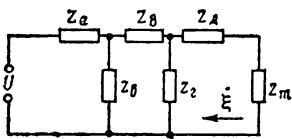


Рис. 3.6. Общий вид эквивалентной схемы

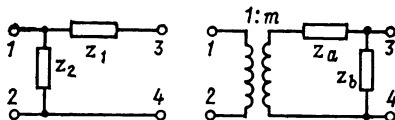


Рис. 3.7. К пояснению метода упрощения эквивалентных схем

женной на рис. 3.2,  $z_d = j\omega S \text{tg } kl/2 \approx j\omega S (\omega l/2c) = j\omega\rho (Sl/2) = j\omega(m/2)$ , где  $m$  — масса стержня. Далее  $\sin kl \approx kl$  и  $z_c = -(j\rho c)/\sin kl \approx -(j\rho c^2 S)/\omega l = -(jY_{ik} S)/\omega l = -j(1/\omega c_m)$ . В ре-

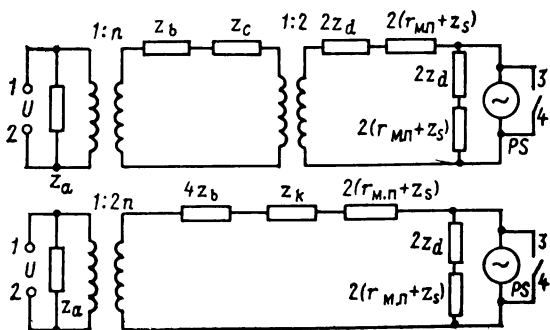


Рис. 3.8. К пояснению упрощения эквивалентной схемы одностороннего стержневого преобразователя

зультате Т-образное звено схемы, показанной на рис. 3.2, упрощается вследствие введения сосредоточенных параметров — эквивалентных массы и гибкости (рис. 3.9, а). Здесь  $c_m = l/Y_{ik} S$ . На частотах в области резонанса более точные результаты получаются в случае за-

мены функции синус, входящей в импеданс  $z_c$ , не аргументом, а двумя членами разложения ее в ряд. Т-образное звено превращается в обозначенное на рис. 3.9, б, в его общую ветвь последовательно добавляется еще одна эквивалентная масса —  $j\omega (m/6)$ . Вблизи основного резонанса для частот примерно  $f_p \pm 0,07 f_p$  при использовании упрощенной схемы, изображенной на рис. 3.8 и введении сосредоточенных

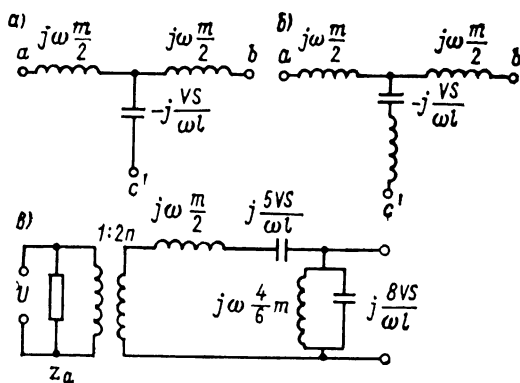


Рис. 3.9. Различные варианты упрощения эквивалентной схемы, приведенной на рис. 3.2

параметров, также возможна замена тригонометрических функций, входящих в импедансы, первыми двумя членами их разложения в ряд. Образуется схема, изображенная на рис. 3.9, в, с комбинацией последовательного и параллельного соединения эквивалентных масс и гибкостей. В диапазоне указанных частот импеданс параллельного контура обычно достаточно велик в сравнении с импедансом практических механических нагрузок, поэтому им в большинстве случаев можно пренебречь.

### § 3.2. ВЫБОР ТИПА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Работа по расчету преобразователя начинается с выяснения ряда вопросов, определяющих его тип. Производится выбор геометрии преобразователя из условий максимальной простоты конструкции применительно к конкретному случаю: удобства компоновки в антенне, широкополосности, частотного диапазона, излучаемой мощности, чувствительности, проводимости и направленности. Затем решается вопрос о наружных размерах преобразователя, определяющих собственную направленность, в том числе и при расположении в ячейке, отведенной для его установки в антенне.

Как цилиндрические, так и стержневые преобразователи могут составлять многоэлементные сканирующие и компенсированные антенны.

В антеннах с компенсацией или сканирующих из резонансных цилиндрических преобразователей может возникнуть задача, свя-

званная с противоречием в размерах, с одной стороны диаметр резонансного цилиндрического преобразователя должен быть равным  $\lambda/\pi$ , с другой — во избежание большого фазового дискрета при компенсации характеристики направленности антенны расстояние между центрами преобразователей должно лежать в пределах  $0,5 \div 0,7\lambda_{в}$ . При больших расстояниях у плоских антенн сокращается сектор сканирования. В связи с этим могут быть применены различные способы компоновки цилиндрических преобразователей в антенне: вертикальное соосное расположение цилиндров (рис. 3.10, а, б); вертикальное со смещением (рис. 3.10, в) (смещение, как известно, необхо-

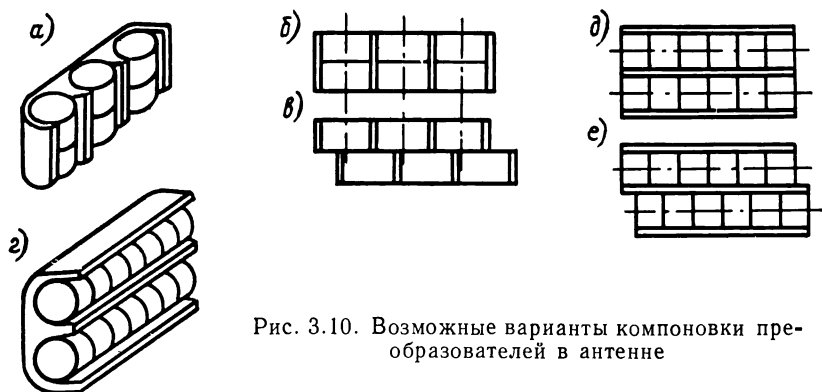


Рис. 3.10. Возможные варианты компоновки преобразователей в антенне

димо для оптимизации направленности секции); горизонтальное расположение, также и со смещением (рис. 3.10, г, д, е). Аналогичные компоновки цилиндрических преобразователей возможны не только на плоской поверхности, но и на поверхности с кривизной, например, цилиндрической формы. Таким же образом можно размещать в антенне и стержневые преобразователи. Существенным отличием их компоновки является отсутствие жесткого требования в отношении размера вдоль апертуры антенны из условия обеспечения резонанса, так как резонансный размер стержневого преобразователя ориентируется в направлении, перпендикулярном рабочей поверхности антенны.

Для расширения полосы пропускания стержневые преобразователи снабжают одной или двумя накладками. Возможны конструкции, в которых определенное количество преобразователей закрепляется на общей накладке. Полоса тем шире, чем в определенных пределах легче материал накладки, меньше ее толщина и больше отношение сечений накладки и активного стержня. Однако следует иметь в виду, что если отношение указанных сечений оказывается больше 2, а толщина накладки меньше  $\lambda_n/40$ , в последней могут возбуждаться нежелательные изгибные колебания.

Выбирая материал накладки для пьезоэлектрического преобразователя, следует помнить, что этот материал должен иметь близкий к керамике коэффициент температурного линейного расширения. В противном случае возможно разрушение пьезокерамики. Наиболее

хорошо по этому параметру сочетаются с пьезокерамикой титан и сталь 35. При необходимости использования иных материалов в сочетании с пьезокерамикой между керамикой и накладкой следует помещать прокладку из названных материалов для развязки механических температурных напряжений в местах соприкосновения материалов с разными коэффициентами расширения.

Пьезоэлектрические преобразователи могут быть рассчитаны на работу с использованием продольного и поперечного пьезоэффекта.

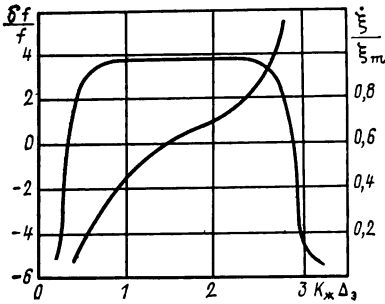


Рис. 3.11. Зависимость резонансной частоты (1) и амплитуды колебательной скорости (2) стержневого преобразователя от зазора до жесткого экрана

В первом случае направление колебаний (резонансный размер) совпадает с поляризующим полем (колебания в направлении электродов), во втором оно перпендикулярно направлению поля (рис. 3.11). Эффективность пьезоматериалов при продольном пьезоэффекте выше, чем при поперечном, и, следовательно, продольному пьезоэффекту следует отдать предпочтение. Однако проектирование преобразователя, рассчитанного на работу с использованием продольного пьезоэффекта, сопряжено с затруднением, связанным с секционированием для снижения величины возбуждающего напряжения и увеличения электрической емкости. Путем

изменения включений и направлений поляризации отдельных секций возможно возбуждение таких преобразователей на различных колебательных модах.

Сборка секционированного преобразователя осуществляется обычно путем склейки эпоксидными смолами. При сборке надо иметь в виду, что призмы имеют определенное направление поляризации. Для получения секционированных преобразователей, работающих на основных резонансных модах, при склейке призмы следует стыковать одноименно поляризованными электродами. Преобразователи с перепутанной поляризованностью могут иметь иные резонансные частоты, ряд резонансов, малую эффективность.

Для исключения тыльного излучения (приема) преобразователи приходится акустически экранировать. Экранировку цилиндрических преобразователей следует выполнять акустически мягким экраном, с волновым сопротивлением, меньшим волнового сопротивления воды. Для этой цели может быть использована специально выпускающаяся промышленностью листовая пористая резина с герметично замкнутыми воздушными порами или с герметичными цилиндрическими каналами [47]. Первая сохраняет экранирующие свойства при гидростатических давлениях примерно до  $10^6$  Па, вторая — до  $4 \cdot 10^6$  Па. Это следует учитывать в случае необходимости проектирования антенн с повышенным заглублением, например, устанавливаемых на тральных устройствах. Возможно применение резонансных

экранов из металла, в которых используется изгибный резонанс пластин.

Экранирование цилиндров для придания им направленности и уменьшения взаимодействия с соседними следует выполнять так, чтобы экранирующая резина прилегала к преобразователю по периметру с боков и тыльной стороны и выступала заподлицо с образующей в направлении апертуры (см. рис. 3.13). В этом случае характеристика направленности цилиндра в плоскости направляющей оказывается близкой к описываемой функцией  $\sin z/z$ .

В качестве экранов стержневых преобразователей также может быть использована резина. Такой экран должен прилегать непосредственно к торцу стержня. Возможно применение и экранов с волновым сопротивлением, большим чем волновое сопротивление воды. Чем больше разнятся волновые сопротивления экрана и воды, тем лучше оказываются экранирующие свойства экрана.

Металлический экран отражает максимум звуковой энергии при его толщине, кратной нечетному числу четвертей волны в материале экрана. Вследствие нерезко выраженной зависимости уменьшения коэффициента отражения с изменением толщины она может быть уменьшена до величины  $\lambda_s/20$ , где  $\lambda_s$  — длина волны в материале экрана.

Для получения максимума отражения звуковой энергии, сохранения резонансной частоты и импеданса преобразователя металлический экран следует располагать от торца преобразователя на расстоянии  $\lambda_{ж}/4$  ( $\lambda_{ж}$  — длина волны в жидкости, окружающей преобразователь) или кратном нечетному числу четвертей  $\lambda_{ж}$  (см. рис. 3.11).

Толщину экранной резины  $\Delta_p$  следует выбирать, ориентируясь примерно следующими соображениями: в области частот 100 кГц и выше —  $\Delta_p \geq 5$  мм, в области частот  $\sim 10 \div 100$  кГц —  $\Delta_p \geq 10$  мм, в области частот  $\sim 3 \div 10$  кГц —  $\Delta_p \geq 20$  мм.

Одним из ограничивающих величину акустической мощности факторов является кавитация — разрыв жидкости под воздействием звукового давления. Появление кавитации может привести к разрушению преобразователя от перегрузки, вызванной увеличением амплитуды его колебаний в связи с уменьшением сопротивления излучения.

Порог кавитации зависит от плотности и вязкости жидкости, частоты и гидростатического давления, длительности излучаемого импульса, наличия в воде примесей и газа, неравномерностей поля звукового давления и колебательной скорости поверхности антенны.

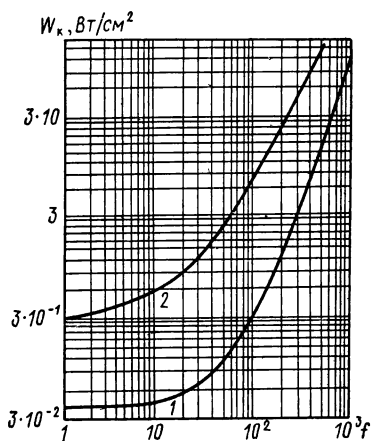


Рис. 3.12. Зависимости удельной акустической мощности, вызывающей кавитацию воды от частоты и насыщенности газом

1 — для воды, насыщенной воздухом; 2 — для обезгаженной воды

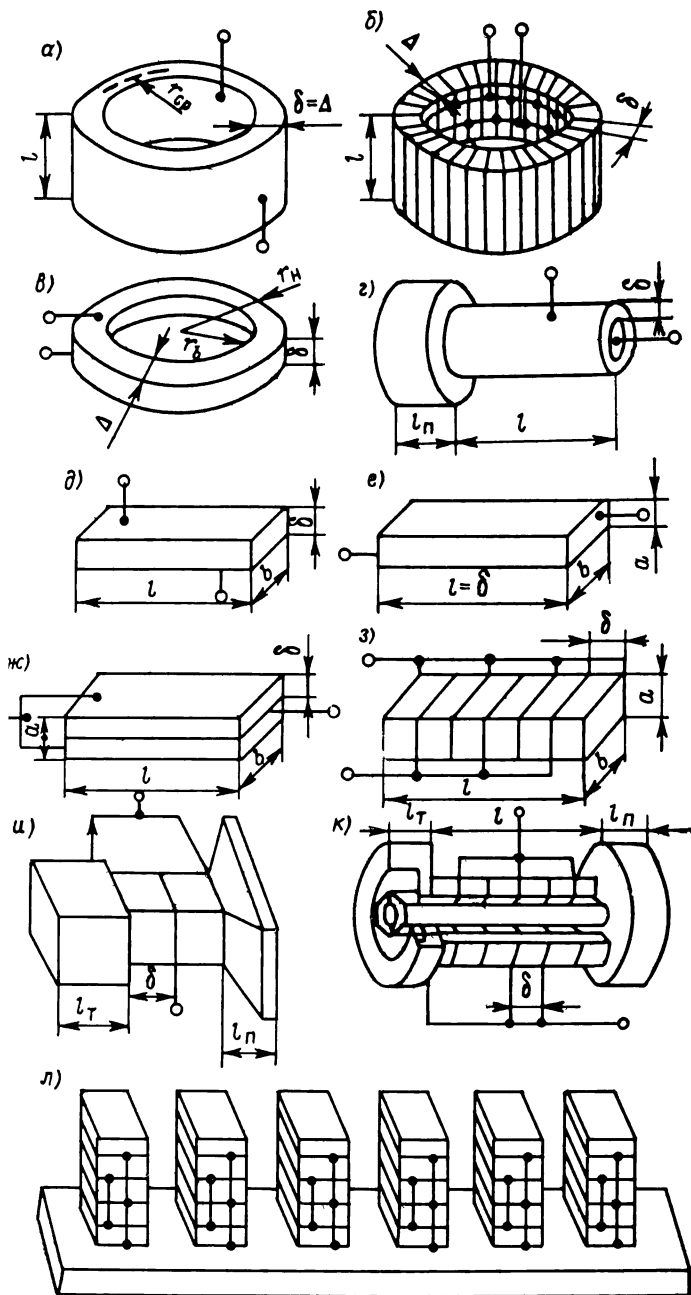


Рис. 3.13. Различные типы преобразователей

Для определения кавитационного порога воды  $W_k$ , Вт/см<sup>2</sup>, от гидростатического давления можно использовать следующее выражение:

$$W_k = 0,3(1 + 0,1)H^2, \quad (3.8)$$

где  $H$  — заглубление антенны.

Зависимость порога кавитации от длительности импульса  $\tau$ , мс, характеризуется следующими цифрами:

$\tau$ , мс	$\infty$	20	10	5	2
$W_k$ , Вт/см <sup>2</sup>	0,3	5	7	10	16

Зависимость порога кавитации от частоты представлена на рис. 3.12.

### § 3.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Техническим заданием на проектирование преобразователя в той или иной совокупности в зависимости от назначения преобразователя, должны быть определены: характеристика направленности; диапазон рабочих частот, частота резонанса, допуск на ее отклонение, режим работы — прием, излучение (непрерывный, импульсный; звуковое давление или акустическая мощность применительно к одиночному преобразователю или группе; подводимая электрическая мощность, допустимое электрическое напряжение возбуждения (или ток); возможно задание чувствительности в режиме излучения в единицах на 1 В; коэффициент полезного действия; абсолютная или удельная чувствительность в приеме в режиме холостого хода; входное сопротивление, активная и реактивная составляющие, электрическая емкость; требования к формам частотных характеристик (полоса пропускания, неравномерность в интервале рабочих частот); рабочее гидростатическое давление; диапазон рабочих температур; максимально допустимые масса и размеры; требования по вибро- и ударостойкости [44, 47].

Расчет обычно начинают с выбора конфигурации и размеров преобразователя, исходя из требований компоновки в антенне и частотных характеристик. Размеры рабочей поверхности определяют по требуемой характеристике направленности либо они обуславливаются габаритами, отведенными для размещения преобразователя в антенне. Одно из наиболее важных условий при расчете преобразователя является знание его резонансной частоты. В большинстве случаев преобразователи проектируются с расчетом для работы на основной резонансной частоте. У стержней это — продольный резонанс, у цилиндров — радиальный, при котором совершаются пульсирующие колебания оболочки; в области наиболее эффективных колебаний располагается обычно два резонанса — механический, используемый для режима излучения, и электромеханический — для режима приема. У пьезоэлектрических преобразователей частота электромеханического резонанса лежит выше частоты резонанса механического. При определении резонансных частот необходимо иметь в виду следующее: механическому резонансу соответствует модуль упругости и скорость

звука в пьезоактивном материале для случая заторможенного преобразователя (режим короткого замыкания), электромеханическому — для случая свободного преобразователя (режим холостого хода).

### 3.3.1. Условия механического резонанса

Обозначения те же, что и на стр. 148. (рис. 3.13).

Общий случай  $f_p = 1/2\pi \sqrt{m_3 c_3}$ .

Цилиндр (при толщине антенны  $\Delta \leq 0,5 r_{cp}$ )  $f_p = [c_i / (2\pi \times \times r_{cp})] \sqrt{1 + (1-t)^2}$ , где  $t$  — определяет колебательную моду. Случай  $t = 1$  соответствует радиальной моде.

Стержень с двумя различными накладками. Поперечный пьезоэффект, продольный пьезоэффект при  $q \geq 4$  или  $k\delta \leq 0,5$

$$\operatorname{tg} kl = \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n (\rho c S)^{-1} + (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T (\rho c S)^{-1}}{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T (\rho c S)^{-2} - 1}$$

Продольный пьезоэффект при  $q \leq 2$

$$\begin{aligned} & (\rho c S \operatorname{tg} kl)_n = \\ & = \frac{1 + (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T (\rho c S \operatorname{tg} kl)^{-1} + k_{33}^2 [2 \operatorname{tg} kl / 2] + (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T (\rho c S)^{-1} (kl)^{-1}}{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T (\rho c S)^{-1} - \operatorname{ctg} kl - k_{33}^2 (kl)^{-1}} \end{aligned}$$

Стержень с двумя одинаковыми накладками  $\operatorname{ctg} (kl/2) = (\rho c S \operatorname{tg} kl)_n$ .

Стержень с одной передней накладкой. Поперечный эффект; продольный пьезоэффект при  $q \geq 4$  или  $k\delta \leq 0,5$ .  $kl = \pi$  или  $f_p = c_i / 2l$ .

Продольный пьезоэффект при  $q \leq 2$

$$(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n = \frac{1 + 2 \left( \frac{k_{33}^2}{kl} \right) \operatorname{tg} (kl/2)}{1 + \left( \frac{k_{33}^2}{kl} \right) \operatorname{tg} kl} \operatorname{tg} kl.$$

Стержень без накладок. Поперечный пьезоэффект; продольный пьезоэффект при  $q \geq 4$  или  $k\delta \leq 0,5$ .  $kl = \pi$  или  $f_p = c_i / 2l$ .

Продольный пьезоэффект при  $q \leq 2$

$$\operatorname{tg} (kl/2) = (kl/2) k_{33}^2. \quad (3.9)$$

Здесь и далее при расчете параметров преобразователей необходимо выбирать скорость звука в пьезокерамике следующим образом. Для поперечного пьезоэффекта —  $c_1^E$ . Для продольного пьезоэффекта при числе секций  $q \geq 4$  или волновой толщине секции  $k\delta \leq 0,5 - c_3^E$ . Для продольного пьезоэффекта при  $q \leq 2 - c_3^D$ ;  $c_1^E$  — скорость распространения колебаний в направлении, перпендикулярном электрическому полю, при постоянной напряженности поля вдоль направления распространения;  $c_3^E$ ,  $c_3^D$  — скорости распространения колебаний в направлении, параллельном электрическому полю при постоянных вдоль направления распространения электрических напряженности поля и индукции.

Определяя соотношения геометрических размеров накладок и активной части стержневого преобразователя, необходимо иметь в виду



следующие соображения. В большинстве случаев колебательную систему приходится строить таким образом, чтобы излучение (прием) осуществлялись передней накладкой в относительно широкой полосе частот, а излучение (прием) тыльной накладкой были малы. Для достижения такого эффекта нужна легкая передняя накладка с поперечным сечением больше поперечного сечения пьезокерамической части, а тыльная накладка должна быть массивной. При этом следует

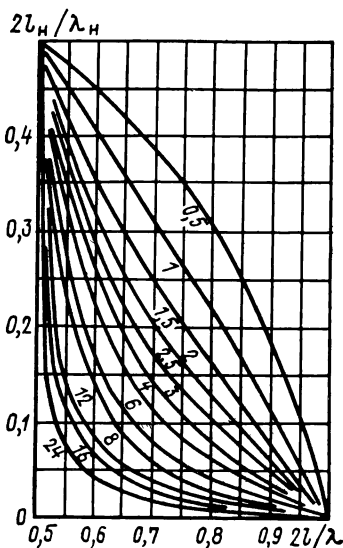


Рис. 3.14. Зависимости, характеризующие связь резонансных размеров элементов стержневого преобразователя с одной накладкой при  $(\rho c S)_n / \rho c S = 0,5 \div 24$

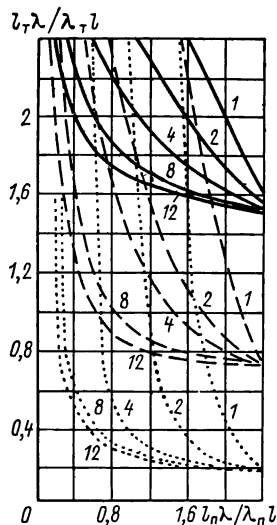


Рис. 3.15. Зависимости характеризующие связь резонансных размеров элементов стержневого преобразователя с двумя различными накладками при  $l = 0,1 \lambda$   $(\rho c S)_n / \rho c S = 1, 2, 4, 8, 12; (\rho c S)_r / \rho c S = l$  —; 3 — —; 13 . . .

помнить, что чрезмерно большое отношение  $S_n/S$  может привести к возникновению нежелательных изгибных колебаний накладки. Оценку допустимых соотношений при плоской накладке можно осуществить с помощью неравенства  $(\lambda_n l_n) / r_n^2 \geq 10$ , где  $r_n$  — наибольший размер по фронту накладки. Профиль осевого сечения накладки с уменьшением толщины от центра к периферии позволяет уменьшить правую часть неравенства в два раза. Тем самым верхний предел частоты рабочего диапазона расширяется. Рекомендуемые величины углов расхождения при конической (пирамидальной) форме тыльной стороны накладки  $60-120^\circ$ . В связи со сложностью расчетных соотношений для ускорения процесса выбора размеров на рис. 3.14—3.17 представлены графики, связывающие резонансные волновые (осевые) размеры пассивных и активной частей стержневых преобразователей при различных отношениях  $(\rho c S)_n / \rho c S$ .

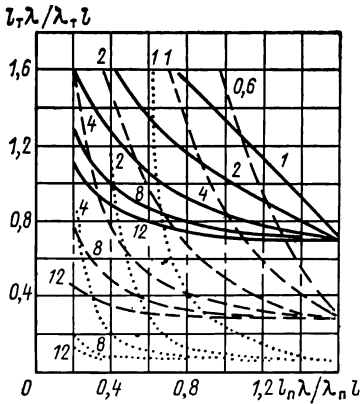


Рис. 3.16. Зависимости, характеризующие связь резонансных размеров элементов стержневого преобразователя с двумя различными накладками при  $l = 0,15$   
 $(\rho c S)_n / \rho c S = 0,6$ ; 1, 2, 4, 8, 12;  
 $(\rho c S)_r / \rho c S = 1$  — — —; 3 — — — —;  
 13 . . . .

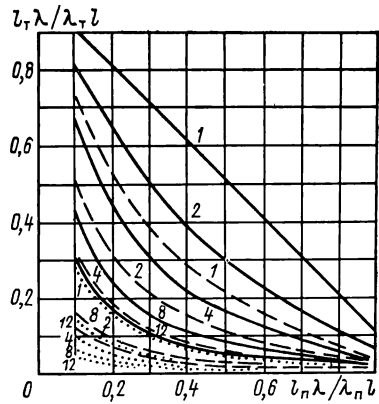


Рис. 3.17. Зависимости, характеризующие связь резонансных размеров элементов стержневого преобразователя с двумя различными накладками при  $l = 0,25\lambda$   
 $(\rho c S)_n / \rho c S = 1$ , 2, 4, 8, 12;  
 $(\rho c S)_r / \rho c S = 1$  — — —; 3 — — — — . . . .

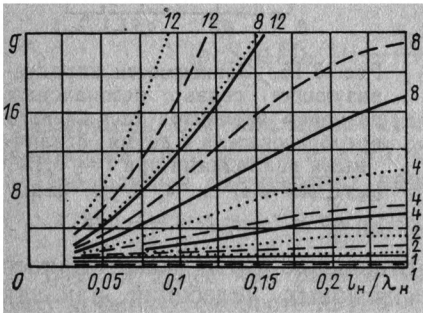


Рис. 3.18. Графики для определения добротности стержневого преобразователя с одной накладкой в зависимости от ее волновой толщины в зависимости от ее волновой толщины при  $(\rho c S)_n / \rho c S = 1, 2, 4, 8, 12$ ;  
 $l = 0,1\lambda$  — — —;  $0,15\lambda$  — — — —;  $0,25\lambda$  . . . .

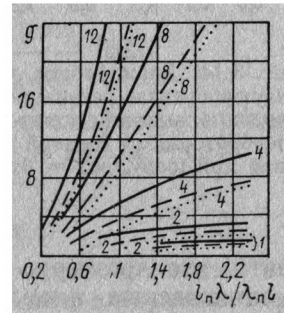


Рис. 3.19. Графики для определения добротности стержневого преобразователя с двумя различными накладками в зависимости от волновой толщины передней накладки при  $l = 0,1\lambda$   
 $(\rho c S)_n / \rho c S = 1, 2, 4, 8, 12$ ;  
 $(\rho c S)_r / \rho c S = 1$  — — —; 3 — — — —, 13 . . . .

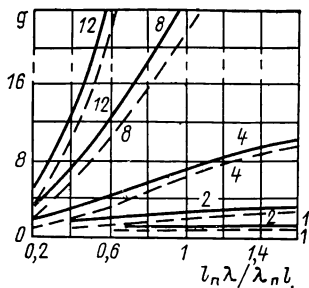


Рис. 3.20. Графики для определения добротности стержневого преобразователя с двумя различными накладками в зависимости от волновой толщины передней накладки при  $l = 0,15 \lambda$

$(\rho c S)_n / \rho c S = 1, 2, 4, 8, 12;$   
 $(\rho c S)_T / \rho c S = 1$  —, 3 — — —,

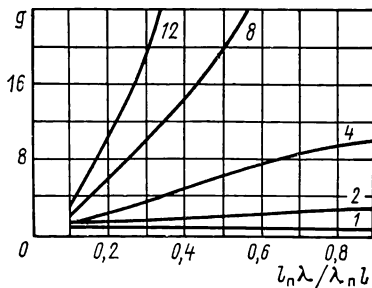


Рис. 3.21. Графики для определения добротности стержневого преобразователя с двумя различными накладками в зависимости от волновой толщины передней накладки при  $l = 0,25 \lambda$

$(\rho c S)_n / \rho c S = 1, 2, 4, 8, (\rho c S)_T / \rho c S =$   
 $= 1; 13$  — — —

### 3.3.2. Механическая добротность нагруженного преобразователя

Цилиндр.  $Q = (2\pi m f_p \eta_{ам}) / r_s$ .

Стержень с двумя различными накладками

$$Q = \frac{kl}{2} \left\{ \frac{(\rho c S)_n}{\rho c S} \frac{(kl)_n}{kl} + \left[ \cos^2(kl) + \frac{(\rho c S)_n^2}{(\rho c S)^2} \sin^2(kl)_n \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ 1 + \frac{\frac{(\rho c S)_T}{\rho c S} \frac{(kl)_T}{kl}}{\cos^2(kl)_T + \frac{(\rho c S)_T^2}{(\rho c S)^2} \sin^2(kl)_T} \right] \right\} \frac{\rho c S}{(\rho c)_B S_n} \eta_{ам}$$

Стержень с двумя одинаковыми накладками

$$Q = \frac{kl}{2} \left[ 2 \frac{(\rho c S)_H}{\rho c S} \frac{(kl)_H}{kl} + \cos^2(kl)_H + \frac{(\rho c S)_H^2}{(\rho c S)^2} \sin^2(kl)_H \right] \frac{\rho c S}{(\rho c)_B S_H} \eta_{ам}$$

Стержень с одной передней накладкой

$$Q = \frac{kl}{2} \left[ \frac{(\rho c S)_H}{\rho c S} \frac{(kl)_H}{kl} + \cos^2(kl)_H + \frac{(\rho c S)_H^2}{(\rho c S)^2} \sin^2(kl)_H \right] \frac{\rho c S}{(\rho c)_B S_H} \eta_{ам}$$

Стержень без накладок

$$Q = (\pi r c / 2 (\rho c)_B) \eta_{ам} \quad (3.10)$$

Для ускорения расчета на рис. 3.18—3.21 представлены графики, связывающие различные размеры стержневых преобразователей. С использованием коэффициента  $g$  добротность можно найти, пользуясь формулой

$$Q = g [(S/S_n) (\pi r c) / 2 (\rho c)_B] \eta_{ам} \quad (3.11)$$

### 3.3.3. Прочность

После предварительного выбора размеров элементов преобразователя необходимо оценить механические напряжения, возникающие в преобразователе при излучении. Динамическая прочность — сопротивление пьезокерамики знакопеременному механическому напряжению не превышает  $50 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ . Прочность снижается при наличии неоднородностей — микротрещин, пор, расслоений клеевых швов, перепадов поперечных сечений.

Оценить максимальные динамические напряжения можно, используя выражения для преобразователя, целиком состоящего из пьезокерамики

$$I_{\max} = 30 \cdot 10^3 \sqrt{W_{\text{ay}}}; \quad (3.12)$$

для стержневого преобразователя с накладками

$$T_{\max} = 30 \cdot 10^3 \sqrt{W_{\text{ay}} \left[ \cos^2(kl)_н + \frac{(\rho c S)_н^2}{(\rho c S)^2} \sin^2(kl)_н \right]}, \quad (3.13)$$

где  $W_{\text{ay}}$  — удельная акустическая мощность (на единицу площади поперечного сечения керамики); в случаях, когда динамическое напряжение достигает величины  $T_{\max}$ , преобразователь необходимо армировать.

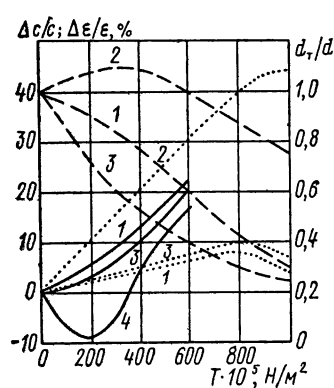


Рис. 3.22. Относительное изменение скорости звука (—), диэлектрической проницаемости (... ) и пьезомодуля (—) от механического напряжения продольного сжатия пьезокерамического стержня для разных составов

1 — ЦТСНВ-1, 2 — ЦТБС-3, 3 — ТВК-3; 4 — ЦТС-23

Цилиндрические преобразователи армируют металлическим бандажом или стекловолокном; стержневые — аксиальной металлической стяжкой, соединенной с торцевыми накладками. Если известны требуемое напряжение армирования  $T_a$  и площадь поперечного сечения керамической части стержня, пользуясь формулой (3.14), можно определить необходимое сечение стяжки:

$$S_a \approx 14,3S (T_a/T_T), \quad (3.14)$$

где  $T_T$  — предел текучести материала стяжки.

После выбора элементов армирования целесообразно оценить изменение резонансной частоты преобразователя. Для этого можно применить следующие выражения:

общий случай, в том числе для цилиндра

$$f_{\text{ра}} = 1/2\pi \sqrt{(m_{\text{ЭК}} + m_{\text{ЭБ}}) c_{\text{ЭК}} c_{\text{ЭБ}} / (c_{\text{ЭК}} + c_{\text{ЭБ}})};$$

для стержневого преобразователя

$$f_{\text{ра}} = f_p \sqrt{1 + (m_a/m) (c_a/c_i)^2}, \quad (3.15)$$

где  $m_{\text{ЭК}}, m_{\text{ЭБ}}, c_{\text{ЭК}}, c_{\text{ЭБ}}$  — эквивалентные массы и гибкости пьезокерамики и бандажа. Для цилиндра  $m_{\text{э}} = 2\pi r_{\text{ср}}\rho S$ ;  $c_{\text{э}} = r_{\text{ср}}/(2\pi YS)$ ;  $m_{\text{а}}, m, c_{\text{а}}, c_i$  — массы материала стяжки и пьезокерамики и скорости звука в этих материалах.

На рис. 3.22 показаны графики, характеризующие изменение основных параметров некоторых пьезокерамических материалов при воздействии армирующих усилий.

### 3.3.4. Мощность КПД

Излучаемая акустическая мощность

$$W_{\text{а}} = W_{\text{э}}\eta_{\text{эа}} = \xi^2 r_{\text{с}}. \quad (3.16)$$

Потребляемая электрическая мощность  $W_{\text{э}} = U^2/R_{\text{вк}}$ .

Механическая мощность  $W_{\text{м}} = W_{\text{а}}/\eta_{\text{ам}}$ .

Коэффициент полезного действия КПД

$$\eta_{\text{эа}} = \eta_{\text{эм}}\eta_{\text{ам}}. \quad (3.17)$$

Вблизи резонанса электроакустический КПД, представленный через произведение электромеханического и акустикомеханического коэффициентов полезного действия, определяется в значительной мере последним, поскольку электрические потери в пьезокерамике обычно невелики

$$\eta_{\text{эм}} = [R_{\text{п}}/(R_{\text{п}} + r_{\text{м}})] \eta_{\text{ам}}. \quad (3.18)$$

### 3.3.5. Колебательная скорость излучающей поверхности (на частоте механического резонанса)

Цилиндр: ненаправленный

$$\dot{\xi}_{\text{п}} = (nU\eta_{\text{ам}})/r_{\text{с}}; \quad (3.19)$$

при одностороннем излучении

$$\dot{\xi}_{\text{п}} = (2nU\eta_{\text{ам}})/r_{\text{с}}.$$

Стержень при одностороннем излучении. С двумя различными накладками

$$\dot{\xi}_{\text{п}} = \frac{nU\eta_{\text{ам}}}{r_{\text{с}}} \cos(kl)_{\text{п}} \left[ 1 + \left( \frac{1 + \frac{(\rho c S)_{\text{п}}^2}{(\rho c S)^2} \operatorname{tg}^2(kl)_{\text{п}}}{1 + \frac{(\rho c S)_{\text{т}}^2}{(\rho c S)^2} \operatorname{tg}^2(kl)_{\text{т}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]; \quad (3.20)$$

с двумя одинаковыми накладками  $\dot{\xi}_{\text{п}} = [2nU\eta_{\text{ам}} \times \cos(kl)_{\text{п}}]/r_{\text{с}}$ ;  
с одной передней накладкой

$$\dot{\xi}_{\text{п}} = \frac{nU\eta_{\text{ам}}}{r_{\text{с}}} \cos(kl)_{\text{п}} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{(\rho c S)_{\text{н}}^2}{(\rho c S)^2} \operatorname{tg}^2(kl)_{\text{н}} \right)^{\frac{1}{2}} \right];$$

четвертьволновый стержень  $\dot{\xi}_{\text{п}} = (nU\eta_{\text{ам}}/r_{\text{с}}) \times [(\rho c S)_{\text{н}}^2/(\rho c S)^2]$ ;

без накладок  $\dot{\xi}_{\text{п}} = (2nU\eta_{\text{ам}})/r_{\text{с}}$ .

**Колебательная скорость излучающей поверхности в общем случае.**  
 Модуль колебательной скорости для цилиндра и в области резонанса для стержня

$$|\dot{\xi}| = \dot{\xi}_p (r_s/r_{sp})^{1/2} [1 + Q^2 (f/f_p - f_p/f)]^{1/2}.$$

Модуль колебательной скорости для стержня без накладок

$$|\dot{\xi}| = (1/2) [1 - \cos(\pi f/f_p)] [\cos^2(\pi f/f_p) + (4Q^2/\pi^2) \sin^2(\pi f/f_p)]^{-1/2}.$$

Комплексная колебательная скорость для стержня в общем виде

$$\begin{aligned} \dot{\xi} = & \frac{nU}{\rho c S \cos(kl)_n} \left[ \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_T}{\rho c S} \operatorname{tg}(kl)_T \right] \left\{ \frac{r_s}{\eta_{ам}} \left[ \frac{\rho c S}{(\rho c S)_n} \operatorname{tg}(kl)_n + \right. \right. \\ & + \frac{(\rho c S)_T}{\rho c S} \operatorname{tg}(kl)_T - \operatorname{ctg}(kl) \left( 1 - \frac{(\rho c S)_T}{(\rho c S)_n} \operatorname{tg}(kl)_n \operatorname{tg}(kl)_T \right) \left. \right] + \\ & + j \left[ \frac{(\rho c S)_n (\rho c S)_T}{(\rho c S)^2} \operatorname{tg}(kl)_n \operatorname{tg}(kl)_T - 1 - \left( \frac{(\rho c S)_n}{\rho c S} \operatorname{tg}(kl) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(\rho c S)_T}{\rho c S} \operatorname{tg}(kl)_T \right) \right] \left. \right\}^{-1}. \end{aligned}$$

### 3.3.6. Коэффициент электромеханической трансформации

Цилиндр  $n = \pi d_{ik} Y_{ik} S_c / \delta$ , где  $S_c$  — полная площадь поперечного сечения.

Поперечный пьезоэффект, электроды на цилиндрических поверхностях (см. рис. 3.13, а)  $n = \pi d_{31} Y_{31} (2l\Delta) / \delta = 2\pi d_{31} Y_{31} l$ .

Поперечный пьезоэффект, электроды на торцевых поверхностях, (см. рис. 3.13, в)  $n = \pi d_{31} Y_{31} (2l\Delta) / \delta = 2\pi d_{31} Y_{31} \Delta$ .

Продольный пьезоэффект, секционированный цилиндр (см. рис. 3.13, б)  $n = \pi d_{33} Y_{33} (2l\Delta) / \delta$ .

Стержень  $n = d_{ik} Y_{ik} (S/\delta) = d_{ik} Y_{ik} (ab) / \delta$ .

Поперечный пьезоэффект, стержень сплошной (см. рис. 3.13, д)  $n = d_{31} Y_{31} b$ .

Поперечный пьезоэффект, стержень секционированный, число секций  $g$  (см. рис. 3.13, ж)  $n = d_{31} Y_{31} (ab) / \delta = d_{31} Y_{31} [(bdg) / \delta] = d_{31} Y_{31} bq$ .

Продольный пьезоэффект, стержень сплошной (см. рис. 3.13, е)  $n = d_{33} Y_{33} [(ab) / l]$ .

Продольный пьезоэффект, стержень секционированный, число секций  $q$   $n = d_{33} Y_{33} [(ab) / \delta] = d_{33} Y_{33} [(ab) / l]$  (см. рис. 3.13, з, и);

$$n = d_{33} Y_{33} q [(ab) / \delta] p \quad (\text{см. рис. 3.13, л}), \quad (3.21)$$

где  $p$  — число стержней;

$$n = d_{33} Y_{33} \pi (r_n^2 - r_b^2) / \delta \quad (\text{см. рис. 3.13, к}). \quad (3.22)$$

Коэффициенты электромеханической трансформации стержней с накладками на торцах и без них одинаковы.

### 3.3.7. Сопротивление

Входное сопротивление преобразователя  $Z_{вх}$  состоит из активной  $R_{вх}$  и реактивной  $X_{вх}$  частей. В свою очередь, активная и реактивная составляющие определяются соотношениями:

$$R_{вх} = (R_{п}r_{м})/(R_{п} + r_{м}); \quad X_{вх} = (X_{с}x_{м})/(X_{с} + x_{м}), \quad (3.23)$$

где  $R_{п} = (2\pi fC \operatorname{tg} \delta)^{-1}$  — сопротивление электрических потерь;  $X_{с} = (2\pi fC)^{-1}$  — емкостное сопротивление;  $r_{м}$  и  $x_{м}$  — активное и реактивное механические сопротивления. Механическое сопротивление состоит из сопротивления излучения  $z_s$  и сопротивления механических потерь  $z_{м.п.}$ . Полное активное механическое сопротивление связано с сопротивлением излучения через акустикомеханический коэффициент полезного действия  $r_s = r_{м}\eta_{ам}$ .

**Механическое сопротивление.** В области резонанса (общий случай)  $r_{м} = r_{мп} [1 + Q^2 (f/f_p - f_p/f)^2]$ ;  $x_{м} = r_{мп} [Q^{-1} (f/f_p - f_p/f)^{-1} + Q (f/f_p - f_p/f)]$ .

**Механическое сопротивление, приведенное к электрической стороне электромеханической схемы.** Цилиндр (на резонансе)  $r_{мп} = r_s / (n^2 \eta_{ам})$ .

Стержень без накладок (на резонансе)

$$r_{мп} = r_s / (4n^2 \eta_{ам}). \quad (3.24)$$

Четвертьволновый стержень (на резонансе)

$$r_{мп} = r_s (\rho c S)^2 / [n^2 \eta_{ам} (\rho c S)_н^2].$$

Стержень с двумя накладками (общий случай)

$$\left. \begin{aligned} r_{м} &= \frac{r_s}{n^2 \eta_{ам} \cos^2 (kl)_{п}} \left[ 1 + \frac{\operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п}}{\rho c S}}{\operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_{т} \operatorname{tg} (kl)_{т}}{\rho c S}} \right]^{-2}; \\ x_{м} &= -\frac{\rho c S}{n^2} \left\{ 1 + \operatorname{ctg} kl \left[ \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п}}{\rho c S} + \frac{(\rho c S)_{т} \operatorname{tg} (kl)_{т}}{\rho c S} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(\rho c S)_{п} (\rho c S)_{т}}{(\rho c S)^2} \times \operatorname{tg} (kl)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{т} \right\} \left[ 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п}}{\rho c S} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\rho c S)_{т} \operatorname{tg} (kl)_{т}}{\rho c S} \right]^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Стержень с одной передней накладкой (общий случай)

$$\begin{aligned} r_{м} &= \frac{r_s}{n^2 \eta_{ам} \cos^2 (kl)_{н}} \left( 2 + \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п} \operatorname{ctg} \frac{kl}{2}}{\rho c S} \right)^{-2}; \\ x_{м} &= -\frac{\rho c S}{n^2} \left[ 1 + \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п} \operatorname{ctg} kl}{\rho c S} \right] \left[ 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_{п} \operatorname{tg} (kl)_{п}}{\rho c S} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Стержень без накладок (общий случай)  $r_{м} = r_s / 4n^2 \eta_{ам}$ ;  $x_{м} = - [(\rho c S) / 2n^2] \operatorname{ctg} (kl) / 2$ .

### 3.3.8. Давление, развиваемое преобразователем

$$P \approx 350 \sqrt{W_a K}. \quad (3.26)$$

В области резонанса  $P = P_p [1 + Q^2 (f/f_p - f_p/f)^2]^{-1/2} f/f_p$ .

### 3.3.9. Электрическая емкость

Цилиндр. Поперечный пьезоэффект, электроды на цилиндрических поверхностях (см. рис. 3.13, а)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} \times 2\pi r_{cp} l / \delta$ .

Поперечный пьезоэффект, электроды на торцевых поверхностях (см. рис. 3.13, в)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} 2\pi r_{cp} \Delta / \delta$ .

Продольный пьезоэффект, секционированный цилиндр, число секций  $q$  (см. рис. 3.13, б)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} l \Delta q / \delta = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \times 10^{-11} l \Delta q^2 / 2\pi r_{cp}$ .

Стержень. Поперечный пьезоэффект, стержень сплошной (см. рис. 3.13, д)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} l b / \delta$ .

Поперечный пьезоэффект, стержень секционированный, число секций  $q$  (см. рис. 3.13, ж)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} l b q / \delta = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \times 10^{-11} l b q^2 / a$ .

Продольный пьезоэффект, стержень сплошной (см. рис. 3.13, е)

$$C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} a b / l \quad (3.27)$$

Продольный пьезоэффект, стержень секционированный, число секций  $q$

$$\left. \begin{aligned} C &= (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} a b q / \delta = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} a b q^2 / l; \\ &(\text{рис. 3.13, з, и}); \\ C &= (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} 2\pi r_{cp} \Delta q / \delta = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} 2\pi r_{cp} \Delta q^2 / l \\ &(\text{см. рис. 3.13, к}); \\ C &= (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} a b q p / \delta = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} a b q^2 p / l \\ &(\text{см. рис. 3.13, л}), \end{aligned} \right\} (3.28)$$

где  $p$  — число стержней.

### 3.3.10. Условия электромеханического резонанса (антирезонанса)

Электромеханический резонанс, или антирезонанс, определяется как механическими, так и электрическими параметрами преобразователя и соответствует частоте, на которой в режиме приема при холостом ходе и воздействии на преобразователь постоянного давления на его электродах развивается максимальное напряжение  $f_a =$

$$= f_p / \sqrt{1 - k_{ik}^2}.$$

$$\text{Цилиндр } f_a = c_i / 2\pi r_{cp} \sqrt{1 - k_{ik}^2}.$$



Стержень с двумя различными накладками

$$\frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n}{\rho c S} = \left[ 1 + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S \operatorname{tg} kl} + \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) \right] \frac{n^2}{\omega C \rho c S} \times \\ \times \left[ \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} - \operatorname{ctg} kl - \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \right]^{-1}. \quad (3.29)$$

Стержень с одной передней накладкой  $(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n = -\operatorname{tg} kl [1 + 2n^2 (\rho c S \omega C)^{-1} \operatorname{tg} (kl/2)] \times [1 + n^2 (\rho c S \omega C)^{-1} \operatorname{tg} kl]^{-1}$ .

Стержень без накладки  $\operatorname{ctg} (kl/2) = -2n^2 (\rho c S \omega C)^{-1}$ .

### 3.3.11. Чувствительность

В области резонанса

$$\gamma = \gamma_a [1 + Q^2 (f/f_a - f_a/f)^2]^{-1/2} f_a/f, \quad (3.30)$$

где  $\gamma_a$  — чувствительность на антирезонансе.

В области частот, значительно ниже антирезонансной  $\gamma = \gamma_n (1 - f^2/f_a^2)^{-1}$ , где  $\gamma_n$  — чувствительность вне резонанса.

**Цилиндр.** Поперечный пьезоэффект (см. рис. 3.13, а)  $\gamma_a = \nu \Delta \rho c d_{31} (\rho c)_B^{-1} [(\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11}]^{-1} \eta_{AM}$ , где  $\nu$  — коэффициент дифракции (см. рис. 3.23);  $\gamma_n = \nu (r_{cp} d_{31} - 0,5 \Delta d_{33}) (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11}]^{-1}$ .

Продольный пьезоэффект (см. рис. 3.13, б):  $\gamma_a = \nu (\delta d_{33} \rho c / (\rho c)_B - 0,5 \Delta d_{31}) \eta_{AM} [(\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11}]^{-1}$ ;  $\gamma_n = \nu (r_{cp} d_{33} \delta / \Delta - 0,5 \Delta d_{31}) (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11}]^{-1}$ .

Стержень с двумя различными накладками

$$\gamma = \left( \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) \left\{ \left( \frac{(\rho c)_B S_n}{\rho c S \eta_{AM}} \right)^2 \left[ \frac{\rho c S \operatorname{tg} (kl)_n}{(\rho c S)_n} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left( 1 - \frac{(\rho c S)_T \operatorname{tg} (kl)_n \operatorname{tg} (kl)_T}{(\rho c S)_n} \right) \operatorname{ctg} kl + \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \left( \frac{\rho c S \operatorname{tg} (kl)_n}{(\rho c S)_n} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) - 1 \right) \right]^2 + \left[ 1 - \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{(\rho c S)^2} - \right. \\ \left. - \operatorname{ctg} kl \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n + (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} + \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n + (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) \right]^2 \right\}^{-1/2} \frac{n S_n \nu}{\rho c S \omega C \cos (kl)_n}. \quad (3.31)$$

Стержень с одной передней накладкой

$$\gamma = \frac{n S_n \nu}{\rho c S \omega C \cos (kl)_n} \operatorname{tg} \frac{kl}{2} \left\{ \left( \frac{(\rho c)_B S_n}{\rho c S \eta_{AM}} \right)^2 \left[ \frac{\rho c S \operatorname{tg} (kl)_n}{(\rho c S)_n} - \operatorname{ctg} kl + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \left( \frac{2 \rho c S}{(\rho c S)_n} \operatorname{tg} (kl)_n \operatorname{tg} \frac{kl}{2} - 1 \right) \right]^2 + \left[ 1 - \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n}{\rho c S} \operatorname{ctg} kl + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n}{\rho c S \omega C} \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n}{\rho c S} \right) \right]^2 \right\}^{-1/2}; \\ \gamma_a = \frac{n \eta_{AM} \nu}{(\rho c)_B \omega C} \frac{(\rho c S \sin kl)_n / \rho c S}{\operatorname{ctg} \frac{kl}{2} + 2n^2 / \rho c S \omega C}.$$

Стержень без накладки

$$\gamma = \frac{n\nu}{\rho c \omega C} (1 - \cos kl) \left\{ \left( \frac{(\rho c)_B S_n^2}{\rho c S \eta_{ам}} \right)^2 \left( \cos kl + \frac{n^2 \sin kl}{\rho c S \omega C} \right)^2 + \left[ \sin kl + \frac{2n^2}{\rho c S \omega C} (1 - \cos kl) \right]^2 \right\}^{-1/2}; \quad (3.32)$$

$$\gamma_a = \frac{n\eta_{ам}\nu}{(\rho c)_B \omega C}; \quad \gamma_n = \nu \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} 0,88 \cdot 10^{-11} \right)^{-1} d_{ik} \delta / 2.$$

**Коэффициент дифракции.** С его помощью учитывается дифракция звуковой волны на приемнике. Полагается, что принимающая поверхность акустически жесткая. Для плоского преобразователя  $\nu = 1 + \frac{r_s}{(\rho c)_B S_s}$ .

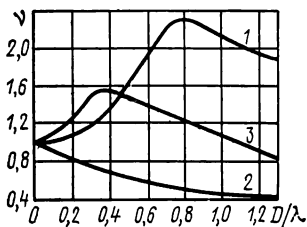


Рис. 3.23. Зависимость коэффициента дифракции от диаметра круглого плоского поршня (1); цилиндрического преобразователя высотой больше  $\lambda_B$  — неэкранированного (2), экранированного в секторе  $180^\circ$  (3)

Для цилиндрического преобразователя  $\nu = (1/\pi) (\lambda_B/r_{нар}^2)$ , где  $r_{нар}$  — внешний радиус цилиндра. См. также рис. 3.23.

Параметры конструкционных материалов, необходимые для проведения расчетов, сведены в табл. 3.3.

### § 3.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА

**Исходные данные.** Спроектировать преобразователь стержневого типа для плоской многоэлементной антенны, устанавливаемой под килем судна на глубине 2 м и работающей в режимах излучения и приема. Рабочая частота 15 000 Гц, углы раствора основного лепестка характеристики направленности и азимутальной и угломестной плоскостях  $\Delta\theta_{0,7} \approx 10^\circ$ ; давление  $P \geq 600\,000$  Па; полоса пропускания  $\Delta f \geq 15\%$ , напряжение возбуждения  $U \leq 400$  В; длительность импульса 5 мс: чувствительность  $\gamma \geq 3000$  мкВ/Па.

**Порядок расчета.** 1. Необходимо определить размеры приемно-излучающей поверхности преобразователя и количество преобразователей в антенне. Габариты антенны  $D_a = D_m = 50,5 \lambda_B / \Delta\theta_{0,7} = (50,5 \cdot 0,1) / 10 = 0,505$  м = 0,5 м, где  $\lambda_B = (c_B/f) = (1,5 \cdot 10^3) / (1,5 \cdot 10^4) = 0,1$  м (см. табл. 2.1 и 2.2). Центры преобразователей располагаем через  $\lambda_B/2$  для уменьшения взаимного влияния.

При этом элементарная ячейка, отводимая для размещения приемно-излучающей поверхности, оказывается равной  $0,05 \times 0,05$  м. С учетом конструктивного зазора определяем размеры приемно-излучающей поверхности квадратной формы равными  $0,045 \times 0,045$  м, с зазором 0,005 м. Количество преобразователей оказывается равным  $(0,5/0,05) (0,5/0,05) = 10 \times 10 = 100$  штук.

2. Поскольку необходимо обеспечить излучение высоких уровней энергии, а резонансные размеры строго не ограничиваются, выбираем в качестве пьезоактивного материала керамику ЦТБС-3.

Таблица 3.3 Параметры конструкционных материалов

Наименование материала	Плотность · 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука в срединной среде 10 <sup>-3</sup> м/с	Скорость звука в стержне · 10 <sup>-3</sup> м/с	Модуль упругости · 10 <sup>9</sup> Н/м <sup>2</sup> стн. 9,8066	Коэффициент Пуассона	Коэффициент температурного расширения · 10 <sup>6</sup> 1/°С	Диапазон рабочих температур °С	Предел текучести · 10 <sup>-5</sup> Н/м <sup>2</sup>	Примечание
Воздух	1,2 · 10 <sup>-3</sup>	0,343	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =4,7
Вода	1	1,5	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,2
Касторовое масло	0,96	1,5	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Конденсаторное масло	0,87	1,43	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Кремнийорганическая жидкость	1	1,28	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Четыреххлористый углерод	1,6	1,59	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Этиловый спирт	0,79	1,18	—	—	—	—	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Дюраль	2,7	6,4	5,2	7,2	0,26 ÷ 0,33	23	—	800—4600	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Латунь	8,5	4,3	3,4	10	0,37	21	—	750—2000	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Вольфрам	19	5,5	4,3	36	0,3	4,5	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Никель	8,9	5,63	4,8	20	0,31	13	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5
Свинец	11,3	2,4	1,25	1,75	0,42	29,5	—	—	ε/ε <sub>0</sub> =2,5

Наименование материала	Плотность · 10 <sup>-3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука в безграничной среде · 10 <sup>-3</sup> м/с	Скорость звука в стержне · 10 <sup>-3</sup> м/с	Модуль упругости · 10 <sup>10</sup> Н/м <sup>2</sup> (сти-9,8066)	Коэффициент Пуассона	Коэффициент температурного расширения · 10 <sup>6</sup> 1/°С	Диапазон рабочих температур °С	Предел текучести · 10 <sup>-3</sup> Н/мм <sup>2</sup>	Примечание
Серебро	10,5	3,6	2,6	7,5	0,37	20			
Сталь	7,8	6,1	5,05	20,5	0,24 ÷ 0,3	11,5		2000—4000	
Титан	4,5	6,0	5,25	11,5	0,35	8,8		4000	
Ртуть	13,6	1,45	—	—	—	0,033			
Гетинакс	1,4	—	2,7	0,1	—	28	—65 ÷ 105		ε/ε <sub>0</sub> = 7
Полиэтилен	0,95	—	0,48	0,02	—	350	—60 ÷ 70		ε/ε <sub>0</sub> = 2,5
Стеклопластик	1,6	—	3	0,15	0,15 ÷ 0,35	95	—60 ÷ 60		ε/ε <sub>0</sub> = 3
Стекло органическое	1,2	—	1,58	0,03	—	—	—60 ÷ 100		
Пенопласт	0,05— —0,2	—	0,28	0,008	0,28	—	—30 ÷ 50		Маслостойкая электроизоляционная
Резина С-572	1,5	1,575	—	—	—	—	—		
Пробка	0,24	—	0,5	—	—	—	—		
Сосна	0,55	—	1,45	—	—	—	—		
Стекло	3,25	5,6	5,3	—	—	—	—		
Лед	0,92	0,916	—	—	—	—	—		

3. Определяем конструкцию в виде набора стержневых преобразователей с двумя накладками каждый. Передние накладки следует выбрать более легкими для достижения желаемой полосы пропускания. Тыльная накладка, вероятно, окажется более массивной. По всей вероятности может потребоваться армирование и полэлементная регулировка частоты. Поскольку гидростатическое давление невелико, относительно легко достигается экранировка воздухом. Для этого целесообразно осуществить вулканизацию передних накладок в единую конструкцию, представляющую собой мозаичную (развязанные через резиновые промежутки шириной 0,005 м пластинки-накладки) приемно-излучающую поверхность антенны.

4. Определяем геометрию преобразователя. Существенное влияние на геометрию должно оказать требование обеспечения заданной полосы пропускания 15 %, т. е. добротности, равной  $Q = f_p/\Delta f = 15\,000/(0,15 \cdot 15000) = 6,6$ . Для нахождения соотношений волновых сопротивлений передней накладки и пьезокерамической части преобразователя воспользуемся графиками, приведенными на рис. 2.18—2.21. Выберем волновую длину пьезокерамической части равной средним значениям  $l = 0,15 \lambda$ , имея в виду, что излишняя длина керамики нерациональна, так как керамику следует размещать в области центра преобразователя, в местах возникновения наибольших механических напряжений. Слишком малая длина также невыгодна из-за необходимости в этом случае иметь увеличенное напряжение возбуждения. Кроме того, следует помнить, что преобразователь должен иметь достаточную электрическую емкость во избежание существенных потерь на линиях коммуникаций. Итак,  $l = 0,15 (c/f) = 0,15 (3,5 \cdot 10^3)/(1,5 \cdot 10^4) = 0,035$  м, где  $\lambda = c/f = 0,233$  м. Добротность пьезокерамической части стержня (3.10)  $Q_k = \{(\pi x)/[2(x)_v]\} \eta_{ам} = (3,14 \cdot 7,2 \cdot 10^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3)/(2 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3) \cdot 0,6 = 15,8$ , где  $\eta_{ам} = 0,6$ , принимаем в связи с тем, что в местах вулканизации между накладками будут возникать механические потери.

Тыльную накладку выполним массивной, из стали, для уменьшения амплитуды колебаний торцевой поверхности и не слишком выступающей за поперечные размеры пьезокерамики:  $(\rho c S)_T = 3\rho c S$ . При добротности пьезокерамической части стержня 15,8 и требуемой добротности всего преобразователя 6,6 с помощью выражения (3.11)  $(S/S_n) g = 6,6/15,8 = 0,42$  и графика, приведенного на рис. 2.19, определяем волновую толщину, волновое сопротивление передней накладки и поперечное сечение керамики. Площадь сечения передней накладки нам известна —  $S_n = 0,045 \cdot 0,045 = 20,25 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Ее толщину целесообразно выбрать малой, но достаточной для обеспечения вулканизации по контуру и размещения заделки конца армирующей стяжки. Из конструктивных соображений выберем толщину передней накладки  $l_n = 0,02$  м. Получаем следующее отношение осевых волновых размеров передней накладки и пьезокерамики:  $l_n/\lambda = \lambda/l = (0,02/0,35) (0,233/0,035) = 0,38$ , где  $\lambda_n = (5,25 \cdot 10^3)/(1,5 \cdot 10^4) = 0,35$  м для титана — легкого, прочного и коррозионно-стойкого в морской воде материала накладки. Выбираем приемлемое отношение волновых сопротивлений передней накладки и пьезокерамики  $(\rho c S)_n/(\rho c S) = 4$ . Из этого условия находим площадь поперечного сечения пьезокерамической части преобразователя  $S = (\rho c S)_n/(4\rho c) = (4,5 \cdot 10^3 \cdot 5,25 \cdot 10^3 \cdot 20,25 \cdot 10^{-4})/(4 \cdot 7,2 \cdot 10^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3) \approx 4,75 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Используя уравнение  $g = 0,42$   $(S_n/S) = 0,42 [(20,25 \cdot 10^{-4})/(4,75 \cdot 10^{-4})] = 1,8$ , проверяем по графикам, показанным на рис. 3.19, соответствие значений параметров:  $g$ ,  $[l_n/\lambda_n]/(\lambda/l)$ ,  $(\rho c S)_n/(\rho c S)$ ,  $(\rho c S)_T/(\rho c S)$ . Выбираем форму сечения в виде круга.

Нам осталось найти площадь поперечного сечения  $S_T$  и осевой резонансный размер  $l_T$  тыльной накладки  $S_T = 3(\rho c S)$   $(\rho c)_T = 3 [(7,2 \cdot 10^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4})/(7,8 \cdot 10^3 \cdot 5,05 \cdot 10^3) = 9,12 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Выбираем форму сечения в виде круга. Его радиус  $r_T = \sqrt{S_T/\pi} = \sqrt{9,12 \cdot 10^{-4}/3,14} = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м. Осевой размер находим с помощью графика, приведенного на рис. 3.15, при  $(l_n/\lambda_n)$   $(l/\lambda) = 0,38$ ;  $(\rho c S)_n/(\rho c S) = 4$ ;  $(\rho c S)_T/(\rho c S) = 3$  и  $l = 0,15 \lambda$ . Имеем  $(l_T/\lambda_T) = 1,2$ , откуда  $l_T = 1,2 \lambda_T/l = 1,2 \cdot 0,337 \cdot 0,15 = 0,06$  м, где  $\lambda_T = c_T/f_p = (5,05 \cdot 10^3)/(1,5 \cdot 10^4) = 0,337$  м.

5. Решение вопросов, связанных с излучаемой мощностью. Излучаемую акустическую мощность антенной находим, используя выражение (3.26)  $P =$

$= 350 \sqrt{W_a K}$ , где  $P \geq 600\,000$  Па,  $W_{aa} = [(6 \cdot 10^5)^2 / (350)^2 \cdot 320 = 0,92 \cdot 10^4$  Вт, где  $K = (4\pi S_a) / \lambda^2 = (12,56 \cdot 0,505 \cdot 0,505) / 0,01 = 320$ ,  $S_a$  — площадь апертуры антенны. Мощность, излучаемая одним преобразователем,  $W_a = W_{aa} / 100 = = 92$  Вт. Задаемся величиной 100 Вт.

Далее необходимо проверить допустимость удельной акустической мощности с точки зрения кавитационной прочности воды и динамической прочности преобразователя. В соответствии с графиком, приведенным на рис. 3.12, при тональном сигнале на частоте 15 000 Гц для воды при средней насыщенности газом, что вполне вероятно для глубины 2 м, допустимая удельная акустическая мощность  $W_{ay} = 0,15$  Вт/см<sup>2</sup>. В эксплуатационном режиме рабочая глубина  $H = 2$  м. Поэтому в соответствии с формулой (3.8) мощность увеличивается:  $W_{ayн} = 0,15 (1 + 0,1 H)^2 = 0,216$  Вт/см<sup>2</sup>. Такая мощность вызывает кавитацию при тональном сигнале. В нашем случае сигнал импульсный, длительностью 5 мс, и допустима большая удельная мощность. В соответствии с таблицей (с. 157) мощность может быть увеличена в  $10/0,3 = 33,3$  раза, т. е.  $W_{ayк\tau} = = 0,216 \cdot 33,3 = 7,19$  Вт/см<sup>2</sup>. Нам необходимо иметь удельную акустическую мощность  $W_{ay} = W_a / S_{\Pi} = 100/20 = 5$  Вт/см<sup>2</sup>. Такая мощность ниже кавитационного порога и вполне допустима.

Удельная акустическая мощность, воздействующая на пьезокерамику, значительно больше:  $S_{\Pi} / S = (20,25 \cdot 10^{-4}) / (4,75 \cdot 10^{-4}) \approx 4,3$ , и  $W_{ayк} = 4,3 \cdot 5 = = 21,5$  Вт/см<sup>2</sup>.

Определяем максимальное механическое напряжение, возникающее в керамике (3.13):  $T_{\max} = 30 \cdot 10^3 \sqrt{W_{ayк}} \times \sqrt{\cos^2 (kl)_{\Pi} + (\rho c S)_{\Pi}^2 / (\rho c S)^2 \sin^2 (kl)_{\Pi}}$   
 $= 30 \cdot 10^3 \sqrt{\cos^2 0,739 + (4,85 \cdot 10^4)^2 / (1,64 \cdot 10^4)^2 \sin^2 0,739} \times \sqrt{21,5} = 295 \cdot 10^3$  Па, где  $(kl)_{\Pi}$  и  $(\rho c S)_{\Pi}$  взяты как средние арифметические по параметрам передней и тыльной накладок.

Удельная акустическая мощность, приходящаяся на керамику, достаточно высока. Она превышает допустимые величины примерно в 4 раза для сплошной керамики и примерно в 7 раз — для секционированного преобразователя. Поэтому для обеспечения работы преобразователя в течение длительного времени необходимо пьезокерамическую часть его армировать. По формуле (3.14) определяем сечение стальной армирующей стяжки:  $S_a = T_{\max} S / 0,07 T_T = [(295 \cdot 10^3 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4}) / (0,07 \cdot 2000 \cdot 10^5)] \cdot 10 = 1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Далее, находим необходимый радиус армирующей стяжки:  $r_a = \sqrt{1 \cdot 10^{-5} / 3,14} \approx 1,8 \cdot 10^{-3}$  м. Выбираем радиус стяжки равным 0,003 м, так как наибольшее напряжения возникает в наименьшем сечении, а именно — в резьбовой части, диаметр по канавке которой будет близок к 0,004 м.

Для размещения стяжки принимаем пьезокерамические элементы в виде шайб с отверстием радиусом 0,006 м с целью обеспечения достаточного во избежание электрического пробоя зазора между керамикой и стяжкой. Найдем наружный радиус пьезокерамических элементов:  $r_{\text{нар}} = \sqrt{S/\pi + r_{\text{вн}}^2} = = \sqrt{4,75 \cdot 10^{-4} / 3,14 + (0,6 \cdot 10^{-2})^2} = \sqrt{1,86 \cdot 10^{-4}} = 1,36 \cdot 10^{-2}$  м.

Теперь необходимо проверить уход резонансной частоты из-за введения стяжки. Заметим, что на основании зависимостей, приведенных на рис. 3.22, уходом резонансной частоты от сжатия пьезокерамики при необходимом в данном случае напряжении армирования можно пренебречь. Используем формулу (3.15):  $f_{pa} = f_p \sqrt{1 + (m_a/m) (c_a/c_i)^2} = 1,5 \cdot 10^4 \sqrt{1 + 0,0088/0,120 [(5,05 \cdot 10^3 / 3,5 \cdot 10^3)]^2} = 1,61 \cdot 10^4$ , где  $m_a = \rho S_a l_a = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 2,82 \cdot 10^{-5} \cdot 0,04 = = 0,0088$  кг;  $m = \rho S l = 7,2 \cdot 10^3 \cdot 4,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,035 \approx 0,120$  кг. Частота повысилась на 7%. Для ее снижения необходимо пропорционально увеличить осевой размер тыльной накладки  $\Delta l_T = 0,06 \cdot 0,07 = 0,0042$  м, т. е.  $l_T \approx 0,064$  м. Регулируя размер тыльной накладки, можно изменять резонансную частоту преобразователя.

6. Расчет электрического напряжения возбуждения. Для этого сначала определяем колебательную скорость излучающей поверхности передней накладки [см. (3.16)]:  $\xi = \sqrt{W_a / r_s} = \sqrt{100/30,375 \cdot 10^2} = 1,81 \cdot 10^{-1}$  м/с, где  $r_s = (\rho c)_B S_{\Pi} = 1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 20,25 \cdot 10^{-4} = 30,375 \cdot 10^2$  кг/с. Такое представление сопротивления излучения допустимо для одного преобразователя, рабо-

тающего синфазно с остальными в антенне больших волновых размеров. После этого находим произведение напряжения возбуждения на коэффициент электро-механической трансформации по формуле (3.20)

$$nU = \xi_{p r_s} / \eta_{ам} \cos(kl)_п \left[ 1 + \left( \frac{1 + (\rho c S)_п^2 / (\rho c S)^2 \operatorname{tg}^2(kl)_п}{1 + (\rho c S)^2 / (\rho c S)^2 \operatorname{tg}^2(kl)_т} \right)^{1/2} \right] = 1,81 \cdot 10^{-1} \times \\ \times 30,375 \cdot 10^2 / 0,6 \cdot 0,936 \left[ 1 + \left( \frac{1 + (22,84 \cdot 10^8) / (2,69 \cdot 10^8) / 0,14}{1 + (24,1 \cdot 10^8) / (2,69 \cdot 10^8) / 4,27} \right)^{1/2} \right] = 786 \text{ кгм/см}^2.$$

Зная предельно допустимое напряжение, находим коэффициент с электро-механической трансформации так, чтобы получить четное число секций (поскольку крайние секции, соединенные электрически через стяжку, должны находиться под одним потенциалом) и приемлемую толщину пьезокерамической шайбы:  $n = 786/400 = 1,97 \approx 2$  (Ас/м)  $\delta = d_{33} Y_{33\pi} \times (r_{нар}^2 - r_{вн}^2) / n = 320 \cdot 10^{-12} \cdot 0,75 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 [(1,36 \cdot 10^{-2})^2 - (0,6 \cdot 10^{-2})^2] / 2 = 5,6 \cdot 10^{-3}$  м [см. (3.22)]. Количество шайб  $l/\delta = 0,035/0,0056 = 6$ . Полная высота шести пьезокерамических шайб  $\delta q = 0,0056 \cdot 6 = 0,0336$  м. Разность высот  $l - \delta q = 0,035 - 0,0336 = 0,0014$  м. Этот размер будет занят семью клеевыми швами.

7. Рассчитываем входное сопротивление и потребляемую электрическую мощность:  $R_{вх} = R_{п r_m} / (R_{п} + r_m) = (39000 \cdot 943) / (39000 + 943) = 920$  Ом (кг м<sup>2</sup>/А<sup>2</sup>·с<sup>3</sup>) формула (3.23), где сопротивление электрических потерь  $R_{п} = (2\pi f C \operatorname{tg} \delta)^{-1} = (6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 7,785 \cdot 10^{-12} \cdot 0,035)^{-1} = 39000$  Ом (кг·м<sup>2</sup>/А<sup>2</sup>·с<sup>3</sup>). Электрическая емкость (3.28)  $C = (\epsilon/\epsilon_0) 0,88 \cdot 10^{-11} 2\pi r_{ср} l / \delta = 2300 \cdot 0,88 \cdot 10^{-11} \cdot 6,28 \cdot (1,36 \cdot 10^{-2} / 2 + 0,6 \cdot 10^{-2} / 2) (0,035/0,0056) = 7785$  пФ.

Механическое сопротивление (3.25)

$$r_m = r_s \left\{ n^2 \eta_{ам} \cos^2(kl)_п \left[ 1 + \frac{\operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_п \operatorname{tg}(kl)_п}{\rho c S}}{\operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S)_т \operatorname{tg}(kl)_т}{\rho c S}} \right]^2 \right\}^{-1} = \\ = 30,375 \cdot 10^2 \left\{ 2^2 \cdot 0,6 \cdot 0,877 \left[ 1 + \frac{0,51 + 2,91 \cdot 0,374}{0,51 + 2,99 \cdot 2,07} \right]^2 \right\}^{-1} = 9430 \text{ Ом (кг·м}^2/\text{А}^2\text{·с}^3).$$

Электроакустический коэффициент полезного действия (3.17)  $\eta_{эа} = \eta_{ам} \eta_{эм} = 0,6 \cdot 0,97 = 0,58$ , где  $\eta_{эм} = 1/(1 + r_m/R_{п}) = 1/(1 + 943/39000) = 0,97$ , формула (3.18).

Потребляемая электрическая мощность (3.16):  $W_э = W_a / \eta_{эа} = 100/0,58 = 172$  Вт (к·м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>).

8. Определение чувствительности  $\gamma$ . Используя условие электромеханического резонанса, определяем резонансную частоту в приеме в режиме холостого хода с помощью уравнения (3.29):

$$\frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_п}{\rho c S} \left[ \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_т}{\rho c S} - \operatorname{ctg} kl - \frac{n^2}{\rho c S 2\pi f C} \right] = 1 + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_т}{\rho c S} \operatorname{ctg} kl + \\ + \frac{n^2}{\rho c S 2\pi f C} \left[ 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_т}{\rho c S} \right].$$

Для определения частоты электромеханического резонанса необходимо решить это трансцендентное уравнение. Находим волновые размеры на частотах 14, 15 и 16 кГц (табл. 3.4). Затем находим значения левой и правой частей уравнения (3.29) при частотах 14, 15 и 16 кГц:  $f = 14$ ;  $2,91 \cdot 0,348 (2,99 \cdot 2,12 - 0,826 - 0,45) = 5,12$ ;  $1 + 2,99 \cdot 2,12 \cdot 0,826 + 0,45 (2 \cdot 0,47 + 2,99 \cdot 2,12) = 9,51$ ;  $f = 15$ ;  $2,91 \cdot 0,375 (2,99 \cdot 2,5 - 0,649 - 0,42) = 6,99$ ;  $1 + 2,99 \cdot 2,5 \cdot 0,649 + 0,42 (2 \cdot 0,51 + 2,99 \cdot 2,5) = 9,41$ ;  $f = 16$ ;  $2,91 \cdot 0,403 (2,99 \cdot 3,22 - 0,33 - 0,39) = 10,45$ ;  $1 + 2,99 \cdot 3,22 \cdot 0,33 + 0,39 (2 \cdot 0,549 + 2,99 \cdot 3,22) = 8,36$ . Для нахождения корня

Таблица 3.4. К решению трансцендентного уравнения (3.29)

$f$ , кГц	14	15	16
$kl$	0,88	0,943	1,004
$(kl)_n$	0,335	0,359	0,383
$(kl)_T$	1,13	1,19	1,27

уравнения строим зависимости левой и правой частей уравнения от частоты. Точка пересечения определяет частоту электромеханического резонанса (рис. 3.24), которая оказывается равной  $f_a = 15,6$  кГц.

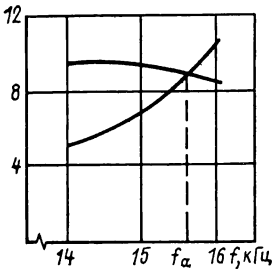


Рис. 3.24. К расчету трансцендентного уравнения для определения частоты электромеханического резонанса стержневого преобразователя с двумя разными накладками

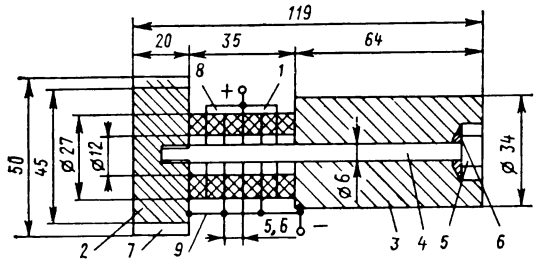


Рис. 3.25. Рассчитанная конструкция армированного стержневого обратимого преобразователя с двумя разными накладками

Рассчитываем чувствительность на частоте механического резонанса  $f_p$  по формуле (3.31)

$$\begin{aligned}
 \gamma_p = & \frac{n S_{пв}}{\rho c S \omega C \cos (kl)_n} \left[ \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right] \left\{ \left[ \frac{(\rho c)_B S_{пн}}{\rho c S \eta_{ам}} \right]^2 \left\{ \frac{\rho c S \operatorname{tg} (kl)_n}{(\rho c S)_n} + \right. \right. \\
 & + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} - \left( 1 - \frac{(\rho c S)_T}{(\rho c S)_n} \operatorname{tg} (kl)_n \operatorname{tg} (kl)_T \right) \operatorname{ctg} kl + \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \times \\
 & \times \left[ \operatorname{tg} (kl)_n \frac{\rho c S}{(\rho c S)_n} \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} - 1 \right) \right]^2 + \\
 & + \left[ 1 - \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n (\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{(\rho c S)^2} - \left( \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n}{\rho c S} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) \operatorname{ctg} kl + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{n^2}{\rho c S \omega C} \left( 2 \operatorname{tg} \frac{kl}{2} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_n}{\rho c S} + \frac{(\rho c S \operatorname{tg} kl)_T}{\rho c S} \right) \right]^2 \right\}^{-1/2} =
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{1,64 \cdot 10^4 \cdot 6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 0,78 \cdot 10^{-8} \cdot 0,937} (0,512 + 2,99 \cdot 2,07) \left\{ \frac{9 \cdot 10^6}{2,7 \cdot 10^8 \cdot 0,36} \times \right. \\
&\quad \times \left\{ 0,34 \cdot 0,37 + 2,99 \cdot 2,07 - 0,72 (1 - 1,03 \cdot 0,374 \cdot 2,07) + \right. \\
&\quad + \frac{12,9}{1,64 \cdot 10^4 \cdot 6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 0,78 \cdot 10^{-8}} [0,34 \cdot 0,37 (2 \cdot 0,51 + 2,99 \cdot 2,07) - 1] \left. \right\}^2 + \\
&\quad + \left[ 1 - 2,91 \cdot 2,99 \cdot 0,374 \cdot 2,07 - 0,72 (2,91 \cdot 0,37 + 2,99 \cdot 2,07) + \right. \\
&\quad + \frac{12,9}{1,64 \cdot 10^4 \cdot 6,28 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 0,78 \cdot 10^{-8}} (2 \cdot 0,51 + 2,91 \cdot 0,37 + 2,99 \cdot 2,07) \left. \right]^2 \left. \right\}^{-1/2} = \\
&\quad + 8,6 \cdot 10^{-3} [9,26 \cdot 10^{-2} [0,126 + 6,19 - 0,15 - 0,1]^2 + [1 - 6,66 - 5,23 + \\
&\quad + 8,87]^2]^{-1/2} = 4,422 \cdot 10^{-3} \text{ В/Па} \approx 4400 \text{ мкВ/Па}.
\end{aligned}$$

Найдем чувствительность на частоте электромеханического резонанса [см. (3.30)]

$$\begin{aligned}
\gamma_a &= \gamma f [1 + Q^2 (f/f_a - f_a/f)^2]^{1/2} f_a^{-1} = 4400 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^4}{1,56 \cdot 10^4} \left[ 1 + 6,6^2 \times \right. \\
&\quad \times \left. \left( 1,5 \cdot 10^4 / 1,56 \cdot 10^4 - \frac{1,56 \cdot 10^4}{1,5 \cdot 10^4} \right)^2 \right]^{1/2} = 4420 \cdot 0,96 [1 + 0,278]^{1/2} = \\
&\quad = 4795 \approx 4800 \text{ мкВ/Па}.
\end{aligned}$$

На рис. 3.25 изображен рассчитанный преобразователь.

## Глава 4

### ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ. ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ

#### § 4.1. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность является одним из главных показателей качества любой аппаратуры (изделия, системы, элемента). Она определяет способность приборов выполнять заданные функции, сохраняя свои параметры в определенных условиях эксплуатации и в течение требуемого промежутка времени. Показатели (критерии) надежности определяются для трех видов аппаратуры: восстанавливаемой (аппаратура после отказа подвергается ремонту и продолжает выполнять свои функции); невосстанавливаемой (при отказе аппаратура не подлежит или не поддается восстановлению по техническим или экономическим соображениям) и необслуживаемой (как правило, эта аппаратура

проектируется самовосстанавливающейся, например, за счет автоматического резервирования\*.

Устанавливаемая на судах ФРП гидроакустическая аппаратура относится к восстанавливаемой и оценивается комплексом показателей надежности, характеризующих ее важнейшие свойства: безотказность, ремонтпригодность, долговечность (ГОСТ 13377—75).

Под *безотказностью* понимается свойство аппаратуры непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени в определенных условиях эксплуатации. Показателем безотказности является наработка на отказ (среднее время работы аппаратуры между отказами); *отказ* — нарушение нормальной работы, при которой аппаратура полностью или частично теряет способность выполнять заданные функции вследствие выхода за установленные допуски значений одного или нескольких основных параметров. Различают внезапные или постепенные отказы. Внезапные или явные отказы возникают в результате резкого, скачкообразного изменения параметров под воздействием многих случайных факторов. Постепенные или неявные отказы характеризуются постепенным плавным изменением параметров в результате износа или старения элементов. Явные отказы отличаются от неявных тем, что первые обычно обнаруживаются при внешнем осмотре или при включении аппаратуры, а для обнаружения отказов неявных требуется применение специальных измерений. В ряде случаев возникают неисправности, не приводящие к отказу аппаратуры, например, перегорание сигнальных ламп, нарушение защитных покрытий, не влияющие на основные параметры. Возможны кратковременные самоустраняющиеся отказы, называемые *сбоями*. Такие неисправности и сбои не учитываются при оценке показателей надежности.

Под *долговечностью* понимается свойство аппаратуры сохранять работоспособность до наступления предельного состояния\*\* при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Показателями долговечности являются технический ресурс или просто ресурс и срок службы. *Ресурс* — наработка аппаратуры от начала эксплуатации, или ее возобновления после среднего или капитального ремонтов, до наступления предельного состояния. *Срок службы* — календарная продолжительность эксплуатации аппаратуры от ее начала, или возобновления после среднего или капитального ремонтов, до наступления предельного состояния. Эти показатели являются основными и должны приводиться в ТЗ на проектируемую аппаратуру

---

\* Резервированием называют включение в состав аппаратуры избыточных электрорадиоэлементов, узлов и приборов, которые берут на себя выполнение функций приборов, вышедших из строя.

\*\* Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустраняемых нарушений требований безопасности: ухода заданных параметров за установленные пределы: снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой: или когда вследствие износа и старения объект пришел в состояние, при котором ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой работоспособности и исправности (ГОСТ 13377—75. Надежность в технике. Термины и определения).

и в технической документации на приборы. К дополнительным показателям надежности, позволяющим в сочетании с основными более полно оценивать надежность проектируемой аппаратуры, относятся следующие:

а) вероятность нормального функционирования в течение заданного времени эксплуатации — вероятность того, что на заданный интервал времени не произойдет ни одного отказа;

б) коэффициент готовности — вероятность того, что аппаратура будет работоспособной в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование аппаратуры по назначению не предусматривается;

в) вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ аппаратуры не произойдет;

г) срок сохраняемости — свойство аппаратуры сохранять установленные эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

Расчет количественных показателей надежности производится на всех этапах проектирования и для условий эксплуатации. Последний выполняется для реальных условий с учетом воздействия факторов, связанных с климатическими и географическими особенностями эксплуатации, реальными режимами работы аппаратуры и условиями ее обслуживания. На основании оценки надежности аппаратуры определяются слабые элементы, узлы, блоки и приборы разрабатываются меры по ее повышению. Если в процессе разработки не определялась конкретная принципиальная схема изделия, численные показатели устанавливаются не превышающими соответствующие для аналогичной аппаратуры, находящейся в эксплуатации.

В логических расчетных схемах различают три вида соединений электрорадиоэлементов: последовательное, параллельное и смешанное, которые оказывают влияние на порядок определения надежности.

*Последовательным* называется соединение, при котором отказ одного любого элемента приводит к отказу прибора, изделия в целом.

*Параллельное* соединение электрорадиоэлементов — это такое включение, при котором отказ аппаратуры наступает только при отказе всех элементов. Подобное соединение применяется с целью резервирования.

По принципиальным схемам определяется  $\lambda$  — число отказавших в единицу времени электрорадиоэлементов, отнесенное к числу электрорадиоэлементов, оставшихся исправными. Значения  $\lambda$  определяются по таблицам, которые разрабатываются и корректируются базовой службой надежности.

Когда в расчетах должны учитываться механические и климатические воздействия и реальные нагрузки на электрорадиоэлементы, определяемые коэффициентом нагрузки  $K_n$  (коэффициент нагрузки — отношение истинного значения к допустимому), оперируют значениями  $\lambda_{ср}$ , которые в этих случаях находятся с помощью выражения:  $\lambda_{ср} = \lambda_0 a_i K_1 K_2$ , где  $a_i$  — берется из таблиц или графиков зависимости от  $K_n$  и  $T_0$ , например из [52].

Электрорадиоэлементы каждого прибора объединяются в группы с примерно одинаковыми значениями  $\lambda$ .

$K_1$  и  $K_2$  — поправочные механический и климатический коэффициенты соответственно. Для судовой аппаратуры  $K_1 = 1,37$ ,  $K_2 = 2,2$ . Рассчитывается общая интенсивность отказов аппаратуры путем суммирования произведений  $N\lambda$  по всем  $n$  группам, т. е.  $\Lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda$ , где  $\lambda$  — средняя, минимальная или максимальная.

**Расчет основных показателей надежности изделия, прибора, узла, логические схемы которых имеют последовательные соединения.** Расчеты выполняются в предположении, что отказы электрорадиоэлементов являются внезапными, случайными и независимыми.

*Наработка на отказ:*  $T_o = 1/\Lambda$ , ч.

*Вероятность безотказной работы в течение заданного времени:*  
 $P(t) = e^{-t/\Lambda}$ .

*Среднее время восстановления:*  $T_b = \sum_{i=1}^m \tau_i / m$ , где  $m$  — количество

восстановлений, равное числу отказов;  $\tau_i$  — время, затраченное на обнаружение, поиск причин отказа и устранение последствий отказа,

$$\tau_i = \sum_{i=1}^9 T_i;$$

*Коэффициент готовности:*  $T_r = T_o / (T_o + T_b)$ . Средний ресурс

$T_{pc} = \sum_{i=1}^n N_i T_{pci} / \sum_{j=1}^n N_j$ , здесь  $n$  — группа из  $N$  элементов со средним ресурсом  $T_{pc}$  при условии, что средняя квадратическая ошибка взвешенного

$$\sigma_{pc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i (T_{pci} - T_{pc})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n N_i}} \ll T_{pc}.$$

#### § 4.2. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Относятся к числу основных показателей любой вновь разрабатываемой или подлежащей модернизации аппаратуры. Характеризуются лимитной и оптовой ценами, экономическим эффектом, при установлении которых главным является усиление экономической заинтересованности проектных, конструкторских, изготавливающих и заказывающих предприятий в создании и быстрейшем внедрении в народное хозяйство новой высокоэффективной аппаратуры, соответствующей по своим параметрам лучшим отечественным и зарубежным образцам.

По размеру экономического эффекта определяют целесообразность разработки новой аппаратуры, обоснованность изобретений и рационализаторских предложений. Он характеризует экономию обществен-

ных затрат, полученных при использовании вновь разработанной или усовершенствованной аппаратуры по сравнению с заменяемой.

*Лимитная цена* определяется по предельно допустимому уровню затрат на производство аппаратуры. Ориентировочные уровни лимитной цены и размера экономического эффекта являются обязательными требованиями ТЗ на проектирование аппаратуры. Их значения определяются заказчиком совместно с разработчиком и уточняются на всех этапах разработки. На заключительном этапе в числе технической документации, предъявляемой разработчиком государственной комиссии по приемке опытного образца (партии), представляется проект оптовой цены и расчет экономического эффекта от производства и использования новой аппаратуры с учетом оптовой цены, приведенной в проекте.

*Оптовая цена* не должна превышать уровня лимитной цены. Органы ценообразования не должны принимать к рассмотрению материалы по ее утверждению при отсутствии в них согласованной между заказчиком и разработчиком лимитной цены. Оптовые цены на новую аппаратуру могут быть без ограничения срока действия, с ограниченным сроком действия, с последовательным снижением на отдельные периоды серийного выпуска аппаратуры.

Определение лимитной цены ( $\Pi_n$ ). Рассчитывается по формуле:  $\Pi_n = C + \Pi_n$ , где  $C$  — себестоимость по стадиям проектирования;  $\Pi_n$  — нормативная прибыль. Себестоимость единицы продукции определяется суммарной себестоимостью:  $C = C_m + C_z + C_n + C_{пр}$ , где  $C_m$  — затраты на сырье, материалы, комплектацию и другие материальные расходы;  $C_z$  — заработная плата;  $C_n$  — накладные расходы;  $C_{пр}$  — прочие затраты, связанные с изготовлением новой аппаратуры. Себестоимость аппаратуры уточняется на всех этапах разработки. Для оценки предварительного уровня себестоимости могут использоваться ее зависимости от изменения параметров по аналогичным изделиям.

*Нормативная прибыль* определяется на основе утвержденных по соответствующим группам продукции нормативов рентабельности по отношению и себестоимости за вычетом стоимости использованных сырья, топлива, энергии, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий. Допускается при расчете лимитной цены поисковой аппаратуры принимать  $\Pi_n$  в среднем в размере 15 % от себестоимости изготовления. Если на разрабатываемую аппаратуру с улучшенными технико-экономическими показателями лимитная цена оказывается выше базовой, то производится проверка обоснованности ее уровня по нижеприведенным формулам. В качестве базовой принимается цена лучшей из освоенной промышленностью аппаратуры. Если новая отечественная аппаратура предназначена для замены импортной, в качестве базовой цены принимается стоимость, указанная в счете иностранного поставщика

$$\Pi_n [\Pi_6 (B_2/B_1) [(1/T_1 + \varepsilon_n)/(1/T_2 + \varepsilon_n)] + [(I_1 - I_2)/(1/T_2 + \varepsilon_n)] \cdot 0,9]^{-1} \leq 0,85,$$

где  $\Pi_6$  — цена базового изделия (действующая по преysкуранту оптовая цена заменяемой аппаратуры);  $B_1$  и  $B_2$  — годовые объемы про-

дукции, производимые соответственно при помощи единицы новой и базовой аппаратуры ( $B_2/B_1$  — коэффициент роста производительности единицы новой аппаратуры по сравнению с базовой);  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно сроки службы базовой и новой аппаратуры до морального износа;  $\epsilon_n$  — нормативный коэффициент эффективности, принимается равным 0,15;  $(1/T_1 + \epsilon_n)/(1/T_2 + \epsilon_n)$  — коэффициент учета изменения срока службы новой аппаратуры по сравнению с базовой;  $I_1$  и  $I_2$  — текущие затраты потребителя на производство годового объема продукции при использовании соответственно единицы новой и базовой аппаратуры (определяются только по изменению прямых затрат и расходов по содержанию и эксплуатации аппаратуры); 0,9 и 0,85 — коэффициенты относительного удешевления новой аппаратуры, гарантирующие снижение лимитных цен на единицу конечного полезного эффекта.

Таблица 4.1. Основные параметры, характеризующие поисковую аппаратуру

Параметр, характеризующий поисковую аппаратуру	Порядок определения параметров
1	2
Площадь или объем акватории, обследуемые в единицу времени	Энергетическая дальность действия; Метод обзора (шаговый поиск однолепестковой или веерной характеристикой направленности, сканированием в заданном секторе, панорамным обследованием); углы раствора характеристики направленности; скоростью судна, при которой обеспечивается устойчивая работа
Время обработки информации	Применение в составе аппаратуры дополнительных устройств и систем (способствующих сокращению времени обработки получаемой информации) например, приборов: отображения подводной ситуации (дисплеев), количественной оценки биомассы обнаруженных объектов промысла
Точность определения координат объекта промысла	Углы раствора характеристики направленности, количеством рабочих частот, величиной мертвой зоны

Положительный экономический эффект \* определяется приростом продукции при использовании новой аппаратуры. Устанавливаемые на судах ФРП гидроакустические поисковые станции и приборы контроля параметров орудий лова способствуют увеличению выпуска продукции. Для этой аппаратуры экономический эффект определяется путем сопоставления с базовым вариантом аналогичных тактико-технических (табл. 4.1) и эксплуатационных характеристик и сфер при-

\* Для аппаратуры, предназначенной для безопасности мореплавания, экономический эффект не определяется.

менения. Улучшение тактико-технических и эксплуатационных характеристик аппаратуры позволяет определить прирост годового объема производства продукции в результате использования новой аппаратуры. Ожидаемое увеличение улова рыбы рассчитывается по формуле

$$\Delta A_{\text{па}} = at_{\text{пр}}\varphi\beta'K_{\text{ку}}, \text{ ц}, \quad (4.1)$$

где  $A_{\text{па}}$  — ожидаемое годовое увеличение улова рыбы судном при использовании новой ПА, ц;  $a$  — улов рыбы судном за промысловые сутки, ц (принимают по нормативным, плановым или фактическим данным);  $t_{\text{пр}}$  — годовое промысловое время судна, сут;  $\beta' = \beta/t_{\text{пр}}$  — удельный вес времени работы судна с орудиями лова в общем (годовом) промысловом времени (принимают по нормативным или фактическим данным);  $K_{\text{ку}}$  — показатель уровня качества новой ПА по сравнению с базовой.

Показатель уровня качества новой аппаратуры определяется по отраслевому стандарту. «Аппаратура гидроакустическая. Методика оценки технического уровня и качества». Числовые значения единичных показателей по надежности, технологичности, эстетике, стандартизации и унификации, патентно-правовые и эргономические определяются с учетом требований: по надежности, технологичности, эстетике, стандартизации и унификации, патентно-правовым; эргономические показатели определяются экспериментально или экспертным методом;  $\varphi$  — коэффициент зависимости вылова рыбы судном от показателей уровня качества ПА. Устанавливается экспертным методом. При определении ожидаемого экономического эффекта на этапах разработки технического задания, эскизно-технического и рабочего проектирования аппаратуры допускается принимать равным 0,1.

Расчет годового экономического эффекта производится по формуле

$$\Theta = [(C_1 + \epsilon_n K_1) - (C_2 + \epsilon_n K_2)] A_2, \text{ руб.} \quad (4.2)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — себестоимость единицы продукции, производимой с помощью базовой и новой аппаратуры, руб;  $K_1 = \Sigma_{K1}/A_1$ ,  $K_2 = \Sigma_{K2}/A_2$  — удельные капитальные вложения по базовой и новой аппаратуре, приходящиеся на единицу продукции, руб;  $\Sigma_{K1}$  и  $\Sigma_{K2}$  — сумма капитальных вложений по базовой и новой аппаратуре;  $A_1$  и  $A_2$  — годовой объем продукции, производимой с помощью базовой и новой аппаратуры в расчетном году в натуральных единицах ( $A_2 = A_1 + \Delta A_{\text{па}}$ );  $\epsilon_n$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений — представляет собой среднюю народнохозяйственную рентабельность в размере 15 коп. на 1 руб. капитальных вложений.

Расчет изменения себестоимости продукции (руб/ц) производится по формуле

$$C_2 = C_1 - \Delta C, \text{ руб/ц},$$

где  $\Delta C = \Delta C' + \Delta C'' + \Delta C'''$ ;  $\Delta C' = (K_1 - K_2) N_a$  — амортизационные расходы;  $\Delta C'' = (K_1 - K_2) N_p$  — расходы на текущий ремонт;  $\Delta C''' = H_y \Delta A / A_2$  — условно-постоянная часть накладных расходов;  $N_a$  —

норма амортизационных отчислений на оборудование;  $N_p$  — норматив затрат на содержание и текущий ремонт оборудования;  $H_y$  — сумма условно-постоянной части накладных расходов для судна в расчете на единицу продукции (улова).

**Пример.** На этапе разработки эскизного проекта определить годовой экономический эффект от использования нового гидролокатора «А» (см. табл. 4.2), предназначенного для оснащения малотоннажных судов, ведущих промысел во внутренних водоемах и прибрежной зоне моря. Гидролокатор разрабатывается по ТЗ, которое приведено в гл. 6. За базовый вариант принят гидролокатор «Б» (см. табл. 4.2). Различия тактико-технических показателей, эксплуатационных характеристик и стоимости разрабатываемого и базового гидролокаторов приведены в табл. 4.2. При расчете экономического эффекта приняты нормативные показатели работы малотоннажных судов (табл. 4.3). Расчет показателя уровня качества гидролокатора «А» приведен в табл. 4.4. Пояснение к таблице.

1. Расчет показателя уровня качества произведен по отраслевому стандарту.

2.  $q_i$  — относительный показатель качества. Определяется из выражений:  $q_i = P_i^A / P_i^B$  или  $q_i = P_i^B / P_i^A$  (выбирается выражение, при котором увеличение относительного показателя соответствует повышению качества аппаратуры),  $P_i^A$  — значение  $i$ -го показателя качества гидролокатора «А»;  $P_i^B$  — значение  $i$ -го показателя качества гидролокатора «Б».

3. Коэффициенты весомости групп и подгрупп показателей, характеризующих аппаратуру,  $\mu_i$  и коэффициенты весомости показателей внутри этих групп и подгрупп  $m_i$  определены из отраслевого стандарта. Если значения относительного показателя качества  $q_i = 1$  (т. е.  $P_i^A = P_i^B$ ), то в расчетах уровня

Таблица 4.2. Тактико-технические и эксплуатационные характеристики гидролокаторов «А» и «Б»

Наименование параметров, характеризующих гидролокатор	Показатели	
	По базовому варианту «Б»	По внедряемому варианту «А»
Дальность действия, $r$ , м	500	600
Точность пеленгования $\theta$ , град	5	4
Системы, повышающие эффективность распознавания объектов промысла «Белая линия»	нет	есть
Срок службы $t$ , лет	8	10
Стоимость $K_1, K_2$ , руб.	8000	10 000

Таблица 4.3. Нормативные показатели работы судов типа «Балтика»

Наименование показателей, характеризующих судно	Показатели
Вылов рыбы судном за сутки промысла $a$ , ц	50
Годовое промысловое время $\tau$ , сут	170
в т. ч. время работы судна, сут.	100
с орудиями лова $\beta$ , %	60
Себестоимость центнера рыбы, вылавливаемой судном, оснащенный гидролокатором «Б» $C_1$ , руб.	30



Таблица 4.4. Определение показателя качества

Группа (подгруппа)	Гидролокатор		$q_i$	Согласно ОСТА, $m_i$	$m_i^* = m_i + m_i'$
	A $P_i^A$	B $P_i^B$			
Тактико-технические	—	—	—	—	—
Дальность действия, м	600	500	1,2	0,35	0,68
Точность определения курсового угла, град	4	5	1,25	0,16	0,32
Показатель надежности	—	—	—	—	—
Срок службы, лет	10	8	1,25	1,0	1,0
Экономический показатель	—	—	—	—	—
Оптовая цена, руб.	10 000	8000	0,8	1,0	1,0
Показатель уровня качества ( $K_{ку}$ )	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 4.4

Группа (подгруппа)	$q_i^* m_i^*$	$Q_i$	Согласно ОСТА, $M_j$	$M_i^* = M_i + M_i'$	$Q_i^* M_i^*$
Тактико-технические	—	—	0,4	0,117	} 0,15
Дальность действия, м	0,816	} 1,216	—	—	
Точность определения курсового угла, град.	0,4		—	—	—
Показатель надежности	—	—	2,0	0,588	} 0,74
Срок службы, лет	1,25	1,25	—	—	
Экономический показатель	—	—	1,0	0,295	} 0,23
Оптовая цена, руб.	0,8	0,8	—	—	
Показатель уровня качества ( $K_{ку}$ )	—	—	—	—	1,12

качества они не учитываются. Расчет производится для значений  $q_i \neq 1$ . В этом случае коэффициенты весомости отдельных показателей и групп (подгрупп) определяются из выражений:

$$m_i^* = m_i + m_i'; \quad \mu_i^* = \mu_i + \mu_i'; \quad m_i' = \left| \left( 1 - \sum_{i=1}^n m_i \right) / \sum_{i=1}^n m_i \right| m_i;$$

$$\mu_i' = \left| \left( 1 - \sum_{i=1}^n \mu_i \right) / \sum_{i=1}^n \mu_i \right| \mu_i,$$

при этом должны быть соблюдены равенства  $\sum_{i=1}^n m_i = 10^a$ ;  $\sum_{i=1}^n \mu_i = 10^a$ , где  $a = 0, 1, 2 \dots$

Ожидаемое увеличение улова рыбы определяем по формуле (4.1)  $\Delta A_{па} = 50 \cdot 170 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot 1,12 = 571$  (коэффициент зависимости улова от показателя качества аппаратуры принимаем средним 0,1). Годовой экономический эффект

от внедрения гидролокатора «А» определится по формуле (4.2). Определяем входящие в эту формулу значения:  $K_1 = 8000/50 \cdot 170 = 0,94$ ;  $K_2 = 10\,000/(50 \cdot 170) + 571 = 1,1$ .

По формуле (4.3)  $C_2 = 30 - 0,86 = 29,14$ ;  $\Delta C = (0,94 - 1,1) \cdot 0,12 + (0,94 - 1,1) \cdot 0,01 + 14 \cdot 571/(50 \cdot 170 + 571) = 0,86$ .

Для малотоннажных судов:  $N_a = 0,12$ ;  $N_p = 0,01$ ;  $H_y = 14$ . Следовательно  $\Theta = [(C_1 + \varepsilon_n K_1) - (C_2 + \varepsilon_n K_2)] A_2 = (30 + 0,15 \cdot 0,94) - (29,14 + 0,15 \cdot 1,1) \cdot 9071 = 7583$  руб.

### § 4.3. ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ

Инженерная психология исследует взаимодействие человека с техническими устройствами в процессе труда, решает задачи приспособления техники к человеку, изучает принципы проектирования систем с учетом психологических и физиологических особенностей человека, составляет основу технической эстетики и художественного конструирования. Инженерная психология сосредоточивает внимание на выявлении закономерностей поведения системы «человек—машина». Система «человек—машина» состоит из оператора и операционной машины. Деятельность оператора носит разнообразный характер. Процесс получения оператором аппаратуры информации можно разделить на три этапа. Первый этап: — *обнаружение* — выделение по индикаторам аппаратуры объекта пеленгования на фоне помех; *различение* — раздельное восприятие двух или более объектов; *опознание* — выделение и классификация существенных признаков объекта. Влияющими факторами при этом являются сложность воспринимаемого сигнала, тип индикатора, масштаб изображения, технические и физические характеристики объектов и приборов. Второй этап: *оценка и переработка информации*. Основными влияющими факторами при этом являются степень сложности опознания, объем и динамика смены информации. Третий этап: *принятие решения и его реализация*.

Характерные примеры действий оператора гидроакустической аппаратуры: 1. При работе с навигационным эхолотом. Обнаружение препятствия по курсу судна, определение степени его опасности для судовождения, в случае необходимости выдача рекомендаций по изменению курса судна. 2. При работе с поисковой аппаратурой. Обнаружение рыбного косяка, определение целесообразности его облова, выдача исходных данных счетно-решающему устройству для получения рекомендаций по времени и месту замета орудий лова и режимов работы судна при облове.

Целью инженерно-психологического проектирования является описание деятельности оператора в системе «человек—машина», выявление ограничений, накладываемых объектами управления на его деятельность и требований к выбору параметров объектов управления. Примером постановки задачи взаимодействия «человек—машина» может служить последовательность действий оператора гидролокатора на рыбном промысле. В районе предполагаемого промысла оператор включает гидролокатор и производит наблюдения по индикаторам, установив: режим автоматического обзора акватории (обычно в секторе  $\pm 90^\circ$ ), максимальные значения шкалы дальности действия, коэффициента усиления приемно-усилительного тракта, длительно-

сти зондирующих импульсов, углов раствора основных лепестков характеристик направленности антенны. Обнаружив по индикаторам косяк рыбы и ориентировочно оценив по силе экосигналов целесообразность его облова, оператор дает рекомендации судоводителю по сближению судна с обнаруженным косяком для уточнения его координат и концентрации и при необходимости переводит гидролокатор в более выгодный режим работы. По мере сближения судна с косяком осуществляется переход на меньшую шкалу дальности действия, длительность зондирующего импульса, коэффициент усиления приемно-усилительного тракта и на более острые характеристики направленности антенны.

К инженерно-психологическим требованиям, предъявляемым к системам «человек—машина», относятся: *гигиенические* (определяющие безвредные и безопасные условия жизнедеятельности человека), *антропометрические* (обусловленные антропометрическими характеристиками и свойствами человека), *физиологические* (учитывающие энергетические возможности мышечного аппарата человека при эксплуатации техники) и *психологические* (определяющие соответствие системы «человек—машина» и ее элементов психологическим особенностям человека: восприятия информации, памяти, мышления, закрепления вновь приобретенных навыков). При проектировании гидроакустической аппаратуры обычно предъявляются следующие требования: для аппаратуры целевого назначения (навигационных и рыбопоисковых эхолотов, лагов, гидролокаторов) гигиенические и психологические; для гидроакустических комплексов (включающих в себя поисковую и навигационную аппаратуру, приборы контроля орудий лова, счетно-вычислительные устройства), конструктивно выполненных в пультовом исполнении, и для приборов контроля орудий лова антропометрические и физиологические.

Воспринимаемая от индикаторов информация может быть визуальной и акустической. Основные психологические требования к индикаторам заключаются в следующем. Объем и форма информации должны соответствовать решаемым задачам, психологическим возможностям человека и способствовать максимально возможной разгрузке оперативной памяти человека. Форма информации должна быть прямой, не требующей от оператора дополнительного перекодирования, и обеспечивать оператору возможность предвидения общей ситуации и результатов своих действий.

Требования инженерной психологии регламентируются стандартами. Так, например, в части стрелочных приборов рекомендуется использовать движение стрелки по неподвижной шкале. Это предпочтительнее подвижной шкалы с неподвижной стрелкой. Не следует применять приборы, у которых подвижны и шкала, и стрелка. Числа отсчета должны содержать не более двух цифр. Если необходимо использовать многозначные числа, допускается применение общего множителя. Для слежения за объектом, отображаемым на индикаторе, рекомендуется преимущественно пользоваться круглыми или дугowymi неподвижными шкалами (из ГОСТа 22908—78 — табл. 4.5, 4.6, 4.7).

Таблица 4.5. Рекомендации по конструированию стрелочных индикаторов

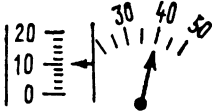





Основная характеристика	Стрелочные индикаторы	Требование
Установка на лицевой панели		Необходимо устанавливать в плоскости, перпендикулярной линии зрения
Выполнение цифр на шкале		Цифры должны быть простыми и нанесены вертикально
Установка стрелок приборов при одновременном контрольном считывании		Стрелки должны иметь одинаковое направление
Выделение рабочих и перегрузочных диапазонов		Диапазоны кодируют цветом либо формой
Выбор системы делений и цифр		Для шкал, устанавливаемых на одной панели, системы делений и цифр должны быть одинаковыми
Выбор цвета фона шкалы, цвета делений и надписей		Необходимо сохранять максимальную контрастность

При инженерно-психологической оценке информации по электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) к ней предъявляются требования по яркости и цвету свечения экрана, контрасту, частоте мелькания изображения, ширине линий, максимальной освещенности экрана, мощности дозы рентгеновского излучения. Цвет свечения экрана выби-

Таблица 4.6. Рекомендации по конструированию шкал, циферблатов индикаторов

Основная характеристика	Шкалы и циферблаты	Требование
Модуль оцифровки		Наиболее удобные для чтения десятичные модули оцифровки
Число делений шкалы		Число делений должно позволять легко считывать показания
Ориентация цифр		Для легкости чтения цифры ориентируются в соответствии с типом используемой шкалы
Ориентация цифр при использовании неполной шкалы		Между началом и концом неполной круговой шкалы должен быть видимый промежуток, значение которого больше основного деления
Ориентация цифр счетчика		Цифры в окне должны появляться в вертикальном положении, причем не менее двух одновременно
Неравномерность оцифровки шкал		Необходимо избегать неравномерности разбивки шкал ввиду сложности интерпретации показаний
Число делений для одинаковых модулей оцифровки		Использование приборов с различным числом делений на модуль оцифровки на одной панели запрещается
Возрастание показаний приборов		Цифры должны возрастать в направлении движения часовой стрелки слева направо или снизу вверх

Таблица 4.7. Рекомендации по конструированию указателей и делений шкал индикаторов

Основная характеристика	Указатели и шкалы	Требование
Расположение указателей и делений шкалы		Указатели и деления шкалы должны быть расположены так, чтобы указатель был близок к делениям, но не перекрывал оцифровку
Цветное деление зон на шкале прибора		Способствует быстрому определению состояния: зеленый — нормально; желтый — предостережение; красный — опасность
Установка стрелки		Расстояние между концом стрелки и делением шкалы должны быть минимальными, не более 1,5 мм
Форма стрелки		Рекомендуется использовать простую клиновидную форму
Расположение стрелки относительно циферблата		Стрелку следует располагать так, чтобы параллакс свести к минимуму
Размер кончика стрелки		Кончик стрелки должен быть такой же ширины, как самое малое деление
Кодирование стрелки цветом		Стрелку и деления следует окрашивать в одинаковый цвет

рается из функционального назначения ЭЛТ [45]. Яркость свечения экрана должна быть не менее  $0,5 \text{ кд/м}^2$ ; контраст экрана запоминающих ЭЛТ — не менее 3 : 1. Ширина линий на индикаторных ЭЛТ должны быть не более 1 мм, на запоминающих — не более 1,5 мм. Допустимая частота мелькания изображения определяется формулой

$f = a \lg B + b$ , где  $B$  — яркость изображения, кд/м<sup>2</sup>,  $a$  и  $b$  — константы, зависящие от размеров и конфигурации знаков. При угловых размерах изображения более 1° и  $B = 1 \div 1000$  кд/м<sup>2</sup>,  $a = 10$ ,  $b = 18$ .

Размеры отображаемых цифро-буквенных изображений, а следовательно, и число знакомест на экране ЭЛТ с учетом условий их оптимального значения и опознания определяются по формуле

$$K_{эл} = \{B_3/[2(1+K)R \operatorname{tg}^{\alpha}/2]\} \{Ш_3/[2(l+t)R \operatorname{tg}^{\alpha}/2]\},$$

где  $B_3$  и  $Ш_3$  — размеры экрана ЭЛТ по высоте и ширине;  $R$  — расстояние до объекта наблюдения:  $K = 0,3-0,6$ ;  $l = 0,1-0,5$ ;  $t = 0,65-0,72$  — безразмерные коэффициенты;  $\alpha$  — угол поля зрения. Для цифр и алфавита при оптимальных значениях яркости, освещенности и контраста величина  $\alpha$  составляет для простых символов 15—18'; средних — 21—26'; сложных — 35—40' (из ГОСТа 23144—78).

Звуковые акустические средства информации могут применяться для подачи предупредительных сигналов, требующих незамедлительного реагирования, например, от устройства опасной глубины в навигационных эхолотах. В качестве предупредительных сигналов рекомендуется применение устройств, генерирующих звук частотой 200—800 Гц с уровнем давления (около слухового прохода) 80—90 дБ \* относительно нулевого порога. Для фиксирования подводной информации путем прослушивания с помощью громкоговорителя или наушников предпочтительнее использование частот 1000—2000 Гц с плавной регулировкой уровня громкости в пределах 20—120 дБ.

Требования инженерной психологии распространяются на размещение индикаторов и органов управления ими. Органы управления должны располагаться ближе к индикаторному устройству, на который они влияют (снизу или слева для операций, выполняемых левой рукой, и снизу или справа — для операций, выполняемых правой рукой); в той последовательности, которая соответствует порядку выполнения рабочей операции; в зоне оптимальной досягаемости, если речь идет о часто используемом органе управления; рабочие операции, требующие особой точности, например, точная настройка, должны выполняться правой рукой. Внешние установочные элементы редкого пользования, в том числе электрические разъемы, штепсели, шнуры, кабели следует размещать за откидными панелями или на задних панелях приборов. Панели, на которых располагаются органы управления и индикаторы, следует монтировать так, чтобы зрительные индикаторы занимали центральную часть, а органы управления находились на периферии, с тем чтобы они не загромождали центрально воспринимаемые объекты. При размещении индикаторов и их органов управления должны учитываться требования художественной эстетики. Композиция лицевых панелей должна осуществляться с учетом особенностей зрительного восприятия, для чего необходимо руководствоваться следующими закономерностями. Движение глаз по горизонталям и вертикалям осуществляется быстрее и точнее, чем

---

\* Нулевой порог слышимости принят равным  $2 \cdot 10^{-5}$  Па ( $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>) и соответствует уровню 0 дБ.

по наклонным прямым; оно всегда направлено от больших по размеру элементов композиции к меньшим, от более контрастных и цветонасыщенных к менее контрастным и цветонасыщенным по отношению к фону и от сгущенных — к разреженным участкам композиции.

Для облегчения работы оператора и повышения ее эффективности органы управления следует кодировать формой, размером, цветом, расположением и группировать по функциональным признакам. Количество цветов ручек управления на одном приборе должно быть не более трех, из которых один основной и один или два дополнительных. При выборе конструкции органов управления необходимо учитывать сложившиеся у человека стереотипы движений (табл. 4.8).

Таблица 4.8. Размещение органов управления

Движение (состояние) управляемого объекта	Действие на органы управления		
	Движение рычага	Поворот рукоятки	Нажатие кнопки, клавиши
Включено Пуск Увеличение Подъем Вправо Вверх	Вверх от себя, вправо	По часовой стрелке	Верхних, передних, правых
Выключено Уменьшение Спуск, вниз, влево	Вниз от себя, влево	Против часовой стрелки	Нижних, задних, левых

Рекомендации по применению (учитывающие инженерно-психологические и эстетические требования) клавишных и кнопочных выключателей и переключателей, тумблеров, поворотных выключателей и переключателей приведены соответственно в ГОСТах 22614—77; 22615—77; 22613—77; 21033—75; 21035—75.

#### § 4.4. ПОКАЗАТЕЛИ СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ

Под унификацией понимается уменьшение многообразия видов и типов изделий одинакового функционального назначения, узлов и деталей, входящих в них. Целями унификации являются повышение производительности труда, снижение стоимости единицы продукции, повышение ее надежности и качества работы.

Под уровнем унификации и стандартизации (изделия) понимается насыщенность его унифицированными и стандартизованными составными частями. Степень унификации и стандартизации как изделия в целом, так и отдельных приборов или систем, входящих в него, характеризуется конкретными числовыми показателями — коэффициентами применяемости и повторяемости. Для единообразия расче-



тов типоразмеры \* составных частей аппаратуры (приборов, систем) принято относить к стандартизованным, унифицированным и оригинальным. Стандартизованные — это составные части изделия, выпускаемые по государственным, республиканским или отраслевым стандартам, а унифицированные — по стандартам данного предприятия, если предприятие является головным в отрасли и если данные части используются хотя бы в двух различных изделиях. К последним относятся такие составные части изделия, которые не изготавливаются на данном предприятии, а поступают в готовом виде (из находящихся в серийном производстве) как комплектующие. Допускается заимствование составных частей от изделий, снятых с производства, но при условии, что техническая документация на их изготовление сохранилась. Оригинальные — это составные части, разработанные только для данного изделия. Коэффициент применяемости характеризует степень насыщенности изделия стандартизованными составными частями. Он вычисляется следующим образом:

— по типоразмерам  $K_{пр} = [(\Sigma_{об} - \Sigma_0) / \Sigma_{об}] \cdot 100 \%$ , где  $\Sigma_{об}$  — общее количество типоразмеров,  $\Sigma_{об} = \Sigma_{ст} + \Sigma_y + \Sigma_0$ ;  $\Sigma_{ст}$ ;  $\Sigma_y$ ;  $\Sigma_0$  — количество типоразмеров соответственно стандартизованных, унифицированных, оригинальных;

— по составным частям  $K_{пр} = [(\Sigma_{об. шт} - \Sigma_{0, шт}) / \Sigma_{об. шт}] \cdot 100 \%$ , где  $\Sigma_{об. шт}$  — общее количество составных частей;  $\Sigma_{ст. шт}$ ,  $\Sigma_{y, шт}$ ,  $\Sigma_{0, шт}$  — количество соответственно стандартизованных, унифицированных, оригинальных составных частей.

Коэффициент повторяемости характеризует степень унификации составных частей в изделии. Определяется по формуле  $K_{п} = \{1 - [(\Sigma_{об} - 1) / (\Sigma_{об. шт} - 1)]\} \cdot 100$ , где  $\Sigma_{об}$  — общее количество типоразмеров;  $\Sigma_{об. шт}$  — общее количество составных частей.

**Пример.** Определить показатели уровня стандартизации и унификации гидролокатора, разработанного по ТЗ, приведенному в гл. 6. Количество стандартизованных, унифицированных, оригинальных типоразмеров, входящих в приборы, блоки и системы гидролокатора, приведены в табл. 4.9.

Коэффициент применяемости:

— по типоразмерам  $K_{пр} = [(\Sigma_{об} - \Sigma_0) / \Sigma_{об}] \cdot 100 \% = (512 - 93) / 512 \times 100 = 81,8\%$ ;

— по составным частям  $K_{пр} = [(\Sigma_{об. шт} - \Sigma_{0шт}) / \Sigma_{об. шт}] \cdot 100 \% = [(839 - 111) / 839] \cdot 100 = 86,7 \%$ .

Коэффициент повторяемости  $K_{п} = \Sigma_{об. шт} / \Sigma_{об} = 839 / 512 = 1,64$ , в процентах  $K_{п} = [1 - (\Sigma_{об} - 1) / (\Sigma_{об. шт} - 1)] \cdot 100 = [1 - (512 - 1) / (839 - 1)] \times 100 = 39 \%$ .

\* Под типоразмером понимается предмет определенной конструкции, характеризующийся конкретными параметрами, исполнением и записываемый отдельной позицией в спецификацию на изделие. Например, на текстолитовой плате собрана схема, состоящая из трех резисторов одного типа и номинала, одного трансформатора и двух сигнальных лампочек накаливания. В состав этой схемы входит четыре типоразмера: резистор и сигнальные лампочки (изделия стандартизованы), трансформатор (изделие унифицировано, плата (изделие оригинальное). Количество составных частей — 7 шт. Если все резисторы различные по типам или номиналам, то количество типоразмеров тоже будет равно 7. При расчетах коэффициентов применяемости и повторяемости из общего числа исключаются детали крепежные, изготавливаемые без чертежей и упаковочной тары и укладки.

Таблица 4.9. К определению уровня стандартизации и унификации гидролокатора

Наименование прибора, блока, системы	Количество типоразмеров			Количество составных частей		
	стандартизованных	унифицированных	оригинальных	стандартизованных	унифицированных	оригинальных
Самописец	8	5	4	15	6	4
Электронный индикатор	80	23	15	170	30	25
Усилитель, блоки: ВАРУ, «Белая линия»	160	40	8	320	50	13
ПВУ	5	3	4	5	10	4
Антенна	4	3	45	6	3	45
Система стабилизации	10	8	5	15	8	5
Универсальный источник питания	40	30	12	50	40	15
Итого	307	112	93	581	147	111
$\Sigma_{об}$	512			839		

## Глава 5

### ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

#### § 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Разработанный на основании материалов эскизного и технического проектов опытный образец изделия в процессе изготовления подвергается испытаниям: предварительным (стендовым и морским) и государственным (межведомственным)\*. Предварительные и государственные испытания в свою очередь подразделяются на швартовные и ходовые. Швартовные проводятся перед выходом судна в море

\* В ряде случаев по специальной программе проводятся промышленные испытания опытного образца изделия с целью уточнения его эксплуатационных характеристик при длительной эксплуатации в реальных промышленных условиях.

и предусматривают проверку состояния аппаратуры, качество ее установки и монтажа, а также основных электроакустических параметров изделия инструментальным методом (с помощью измерительных приборов). Ходовые испытания проводятся в реальных условиях эксплуатации и предусматривают всестороннюю проверку изделия на соответствие тактико-эксплуатационным характеристикам, оговоренным в ТЗ на разработку. Предварительные испытания проводятся по программам и методикам, выполненным разработчиком изделия и согласованным с заказчиком; государственные — по программе и методике, разработанным заказчиком и согласованным с разработчиком. Программы испытаний содержат, как правило, два раздела, общий, в котором указывается цель, место и условия проведения испытаний (например, испытания проводятся во внутренних водоемах и в прибрежной морской зоне на глубинах соответственно 20 и 200 м при различных профиле дна и структурах грунта), и раздел, содержащий перечень параметров и эксплуатационных характеристик изделия, подлежащих проверке, технические требования к параметрам и методике испытаний. В технических требованиях указываются конкретные значения проверяемых параметров, расчетные величины которых приводятся в материалах технического проекта. В методике испытаний — используемая для проверки контрольно-измерительная аппаратура, порядок подключения ее к проверяемым приборам, способы и последовательность измерений и, при необходимости — расчетные формулы.

**Пример.** Проверка электрической мощности генератора.

Техническое требование: электрическая мощность генератора должна быть не менее 200,0 Вт.

Методика проверки: проверка действующего значения электрической мощности генератора производится при включенной аппаратуре путем измерения по осциллографу амплитудного значения напряжения на выходе генератора при минимальном значении длительности зондирующего импульса. Мощность рассчитывается по формуле:  $W_{эл} = (U_m K)^2 / (Z_n \cdot 1,41)$ , Вт, где  $U_m$  — амплитудное значение напряжения (в импульсе), В;  $Z_n$  — сопротивление нагрузки генератора (полное сопротивление антенны), Ом;  $K$  — коэффициент передачи (делителя напряжения).

Амплитудное значение напряжения на выходе генератора определяется при помощи осциллографа типа С1-65, включенного на эквивалент нагрузки (антенны) через делитель напряжения ( $K$ ), обеспечивающий снижение напряжения выхода генератора до напряжения, не превышающего допустимое на входе осциллографа.

**Примечание.** Величина  $Z_n$  приводится в технической документации, прилагаемой к изделию.

Зафиксированные государственной комиссией в протоколах и акте на государственных испытаниях значения электроакустических параметров, обеспечивающие тактико-технические и эксплуатационные характеристики изделия, оговоренные в требованиях ТЗ заказчика, приводятся в технических условиях (ТУ) и являются обязательными при серийном производстве изделия.

Перечень обычно проверяемых электроакустических параметров, тактико-технических и эксплуатационных характеристик изделия приведен в табл. 5.1. Общепринятые в радиотехнике и акустике проверки электрических и ряда электроакустических параметров и ха-

Таблица 5.1. Измеряемые параметры

Параметры, подлежащие проверке	Предварительные испытания		Госиспытания
	стендовые	морские	
Сопrotивление изоляции антенны	+	+	+
Потребляемая мощность	+	+	+
Резонансная (рабочая) частота генератора	+	+	+
Длительность и форма радиоимпульсов	+	+	+
Частота и стабильность следования радиоимпульсов	+	+	+
Электрическая мощность генератора	+	+	+
Кoэффициент усиления усилителя:			
по выходу на самописец	+	+	+
по выходу на электронный индикатор	+	+	+
Собственные шумы усилителя	+	+	+
Амплитудная и частотная регулировочные характеристики усилителя	+	+	+
Глубина и длительность ВАРУ	+	+	+
Импеданс антенны	+	+	+
Частотная характеристика антенны	+		
Углы раствора характеристики направленности антенны	+		
Звуковое давление	+	+	+
Чувствительность антенны в режиме приема	+	+	
Точность пеленгования			+
Дальность действия			+
Уровень помех, воспринимаемых приемоусилительным трактом		+	+
Проверка системы:			
«Белая линия»			+
«Дно»			+

рактических характеристик, использующихся при испытаниях изделия, не требуют специальных пояснений.

Рассмотрим имеющие специфические особенности методы проверок электроакустических параметров и эксплуатационных характеристик ПА, из числа приведенных в таблице. Нормы и методика проверки ПА на механические и климатические воздействия приводятся в отраслевых стандартах и определяются теми предельными условиями, при которых она будет эксплуатироваться.

В процессе изготовления антенн с заданными параметрами необходим контроль качества преобразователей и их узлов для выявления и отсева бракованных преобразователей и пьезоэлементов из-за нарушения технологии изготовления или увеличения разброса параметров допустимых пределов.

После изготовления антенны необходимо убедиться, в том, что ее параметры соответствуют заданным. В ряде случаев, когда антенна

достаточно сложна (например, при многоканальности) целесообразно произвести согласование антенны с аппаратной частью и произвести повторные измерения параметров антенны вместе с аппаратной частью станции, см. [35] главу IX.

Нормы и методика проверки на механические и климатические воздействия навигационной аппаратуры (навигационные эхолоты, доплеровские лаги) приводятся в документации Регистра СССР.

## **§ 5.2. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН И ОБТЕКАТЕЛЕЙ ПРИ ШВАРТОВНЫХ ИСПЫТАНИЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Цель этих измерений заключается в проверке работоспособности антенн после монтажа и настройки аппаратуры на судне. В зависимости от особенности установки антенны оказывается возможным измерение тех или иных параметров. Если антенна проста по конструкции, например, синфазный плоский поршень с размерами большими длины волны, объем необходимых проверок может быть сокращен, так как вероятность соответствия такой антенны необходимым требованиям после монтажа на судне довольно высока.

В большинстве случаев достаточно проверить частотную характеристику потребляемой электрической мощности или даже частотную характеристику проводимости на соответствие измеренной в процессе изготовления. Весьма желательной является проверка развиваемого давления. По результатам замера давления или чувствительности можно составить суждение о звукопрозрачности обтекателя.

У антенны, установленной на поворотном устройстве, целесообразно измерять ХН. Если антенна сложная, с управляемыми ХН, например рефлекторная или с фазовой компенсацией, проверка направленных свойств перед началом эксплуатации крайне желательна. Необходимо также измерение эффективности по каналам для устранения возможных разбросов амплитуд и фаз возбуждения с учетом разбросов параметров электронных трактов станции.

Методы измерения параметров антенн аналогичны описанным выше. Некоторые особенности, которые могут встретиться при швартовных испытаниях, целесообразно отметить. Объем измерений ограничивается рядом факторов: остротой направленности антенны, возможностью ее вращения, соотношением критической зоны формирования ХН и протяженности судна, наличием бочек и пирсов для устойчивости швартовки, погодными условиями, глубиной места, возможностью применения измерительных координатных устройств для перемещения измерительного гидрофона или излучателя вокруг неподвижной антенны.

Если антенна установлена на судне таким образом, что ось ее параллельна поверхности воды и расстояние до носовой части судна от места ее установки таково, что на этом расстоянии уже формируется ХН, процесс измерений упрощается, так как измерительный излучатель и гидрофон могут быть установлены на этом же судне (рис. 5.1, а).

Если антенна неподвижна, то при отсутствии координатного устройства оказывается возможным измерение только развиваемого антенной звукового давления. В случае же установки антенны на поворотном устройстве или с помощью координатного устройства можно измерить ХН.

Если расстояние от места установки до носа судна меньше допустимого, измерительный излучатель приходится устанавливать на другом плавающем основании или пирсе, или выносить с помощью

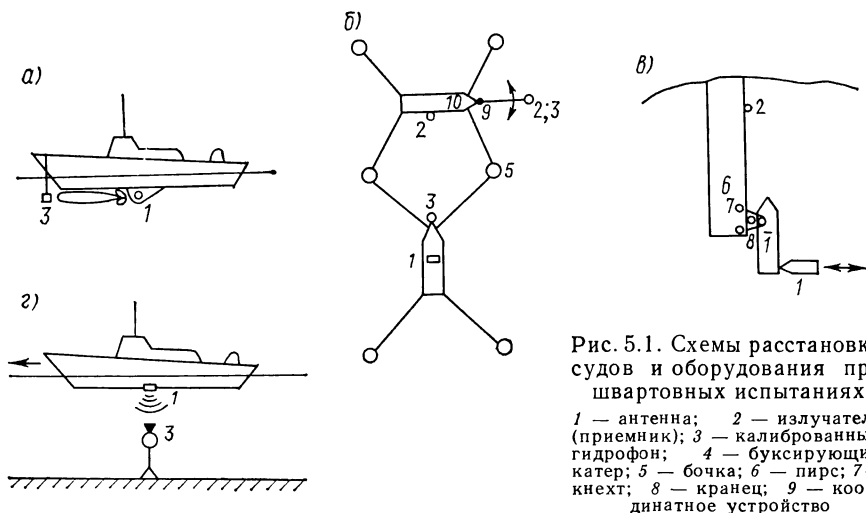


Рис. 5.1. Схемы расстановки судов и оборудования при швартовных испытаниях

1 — антенна; 2 — излучатель (приемник); 3 — калиброванный гидрофон; 4 — буксирующий катер; 5 — бочка; 6 — пирс; 7 — кнехт; 8 — кранец; 9 — координатное устройство

измерительного координатного устройства. В этом случае оказывается возможным измерение и чувствительности, так как измерительный гидрофон можно разместить между излучателем и антенной. Для успешного проведения измерений с использованием расположения приборов на разных основаниях необходимо устойчивое раскрепление судов (см. рис. 5.1, б, в, г).

Во всех случаях измерительные излучатели и гидрофоны лучше устанавливать на жестких штангах, позволяющих изменять их заглубление. В качестве измерительных излучателей и гидрофонов хорошо использовать цилиндрические антенны, направленные в вертикальной плоскости и ненаправленные по горизонту. Вблизи отражающего объекта, например, у пирса, следует применять излучатель, направленный в обеих плоскостях, с хорошим тыльным экраном.

Район испытаний нужно выбирать закрытый от воздействия ветра с достаточной глубиной и слабоотражающим грунтом. Чем меньше водоизмещение судна и острее ХН, тем ближе состояние моря должно быть к штилевому.

При необходимости получения дополнительной информации о воздействии обтекателя на направленные свойства антенны или измерений ХН неподвижной антенны можно применять поворот судна с помощью собственных лебедок или буксировки катером. В этом случае измерительный излучатель (гидрофон) устанавливается на

другом судне или пирсе, нос судна с измерительной антенной закрепляется на бочках или у пирса на некотором расстоянии (рис. 5.1), а корма поворачивается катером или путем стравливания и выбора кормовых швартовых. ХН записываются с помощью самописца, угловые отметки берутся по пеленгу.

Звукопрозрачность обтекателя можно оценить сравнением чувствительности антенны, измеренной с гидрофонами, установленными вне обтекателя и внутри него. Внутри обтекателя из-за отражения от стенок, антенны, поворотного устройства и особенностей прохождения звука через оболочку и реберный набор возможны флуктуации поля, возникновение максимумов и минимумов давления. Измерения поэтому необходимо вести с использованием импульсного сигнала минимальной длительности, гидрофоны, располагать так, чтобы прямой и отраженный сигналы разделялись.

Оценка направленности и эффективности эхолота, обращенного в сторону дна, может быть произведена с помощью притопленного на буге направленного к поверхности гидрофона. Судно проходит над гидрофоном, с помощью которого фиксируется изменение давления в зависимости от расстояния до судна. Полученные данные следует откорректировать, умножая величину измеренного давления в каждом направлении на коэффициент, пропорциональный расстоянию до судна, так как звуковое давление в сферической волне уменьшается в зависимости от расстояния по закону обратной пропорциональности (см. рис. 5.1.г).

В процессе эксплуатации необходим периодический контроль исправности антенных устройств. Об исправном состоянии антенны может говорить наличие реверберации при посылке сигнала. Если возникает сомнение в работе антенны, следует произвести измерения сопротивления изоляции и емкости (или индуктивности у пьезомагнитных антенн) на предмет выявления коротких замыканий и обрывов в трассах, потребляемую мощность на рабочей частоте и развиваемое звуковое давление. Для контроля можно пользоваться сравнительными данными, измеренными на уменьшенных расстояниях. В некоторых случаях целесообразна установка постоянных контрольных гидрофонов и излучателей в обтекателе или перед ним.

### **§ 5.3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОИСКОВОЙ АППАРАТУРЫ**

Проверка ПА производится на соответствие эксплуатационных характеристик установленным требованиям и нормам в условиях, оговоренных программой испытаний. Проверка дальности действия, точности пеленгования и разрешающей способности аппаратуры осуществляется с помощью искусственных целей. В качестве последних используются откалиброванные по отражательной способности и частоте уголкового отражатели и пустотелые или сплошные металлические сферы.

Из-за рефракции акустических волн при распространении в морской воде энергетическая дальность гидроакустической аппаратуры изменяется. Наиболее неблагоприятной является отрицательная рефракция — искривление звуковых лучей в сторону дна вследствие уменьшения скорости звука с глубиной. Максимальную горизонтальную дальность обнаружения цели на заданной глубине  $h_u$  в условиях отрицательной рефракции можно определить по формуле [5]:  $r_r = [2h_u (G_a / |G_c|)]^{1/2}$ , где  $C_a$  — скорость звука на глубине расположения антенны;  $|G_c|$  — модуль вертикального градиента скорости звука.

Для определения геометрической дальности действия необходимо знать градиент скорости звука по глубине. С этой целью проводится гидрологическое обследование района испытаний и сравнение данных с предельно допустимыми. Модуль вертикального градиента скорости звука определяется путем распределения температуры воды по глубине. Измерителем может служить батитермограф типа ГМ-7<sub>ш</sub> и

Рис. 5.2. Диаграмма распределения температуры воды по глубине, полученная с помощью батитермографа  
1 — линия давлений; 2 — изменение температуры воды; 3 — слой температурного скачка

ГМ-9<sub>ш</sub>. Замеры выполняются не менее, чем в трех точках акватории, лежащих на окружности радиусом, равным горизонтальной дальности действия  $r_r$ , и в месте установки искусственной цели. На рис. 5.2 приведена одна из наиболее характерных кривых изменения

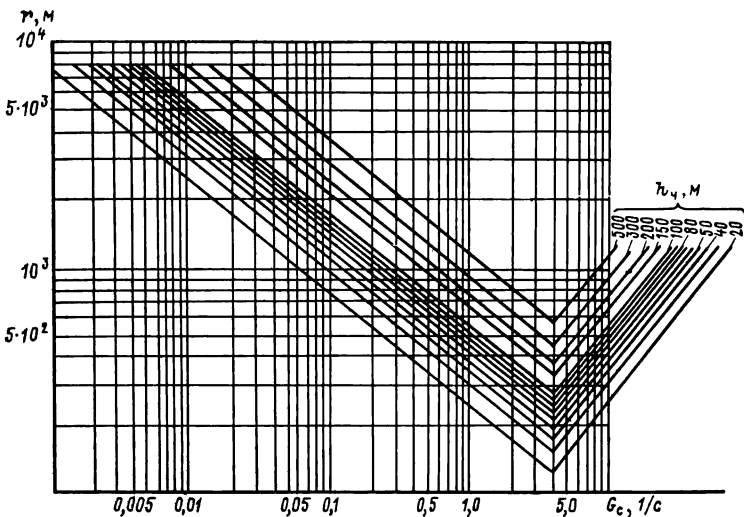


Рис. 5.3. Номограмма для определения модуля градиента скорости звука с изменением глубины



температуры воды, полученная с помощью батитермографа. Модуль градиента скорости звука по данным измерений определяется из выражения  $|G_c| = (4,206 - 0,073 t_{cp} [\Delta t / (h_{ц} - h_a)]$ , 1/с где  $\Delta t$  — разность температур на глубинах расположения антенны  $h_a$  и цели  $h_{ц}$ , С°,  $t_{cp} = (h_{ц} - h_a) / 2$ . Градиент, рассчитанный по данным измерений вертикального распределения температуры воды, сравнивается с градиентом скорости звука, полученным из номограммы (рис. 5.3) для выбранных условий проведения испытаний. Гидрология акватории в районе испытаний считается благоприятной, если измеренный гра-

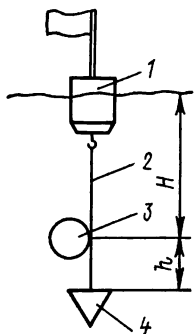


Рис. 5.4. Схема установки искусственной цели для проверки дальности действия поисковой аппаратуры вертикального лоцирования

1 — свободно плавающий буй; 2 — буйреп; 3 — искусственная цель; 4 — груз

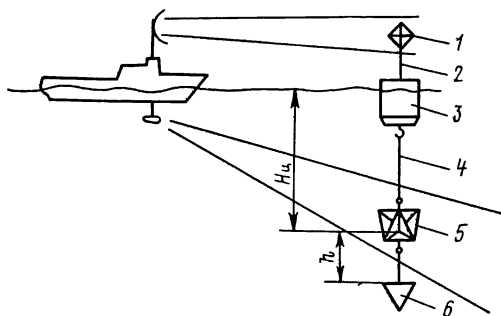


Рис. 5.5. Схема установки искусственной цели для проверки дальности действия поисковой аппаратуры горизонтального лоцирования

1 — радиолокационный уголкоый отражатель; 2 — шток отражателя высотой ~ 3 м; 3 — свободно плавающий буй; 4 — буйреп; 5 — искусственная цель; 6 — груз

диент скорости звука меньше или равен градиенту, полученному из номограммы. Если кривая распределения температуры воды по глубине имеет ярко выраженный нелинейный характер, толщу воды разбивают на слои толщиной  $\Delta h_i$ , в пределах которых может быть допущена линейная аппроксимация. Определяют градиент скорости  $|G_c|$  в каждом слое. Суммарный градиент рассчитывается по приближенной формуле  $|G_c| = 1 h_{ц} \times \sum_{i=1}^n |G_{ci}| \Delta h_i$ .

Из номограммы следует, что в условиях отрицательной рефракции для обнаружения цели, находящейся у поверхности воды на дистанции более 1000 м, необходим градиент скорости звука по модулю менее  $0,05 \text{ с}^{-1}$  (что практически встречается редко).

**Пример.** Для  $h_{ц} = 50$  м и  $r_{ц} = 700$  м максимальный градиент скорости звука  $|G_c|$ , при котором еще возможен надежный эхоконтакт с целью, составит  $0,3, \text{ с}^{-1}$ .

Из номограммы следует, что в условиях отрицательной рефракции для обнаружения цели, находящейся у поверхности воды на дистанции более 1000 м, необходим градиент скорости звука по модулю менее  $0,05 \text{ с}^{-1}$  (что практически встречается редко).

**Проверка дальности действия аппаратуры вертикального лоцирования — рыбопоисковых эхолотов и гидролокаторов в режиме эхолотирования.** Проверка производится по искусственной цели. В качестве

искусственной цели используется пустотелая или сплошная металлическая сфера с отражательной способностью  $R_z$ , оговоренной в программе испытаний. Цель, закрепленная на тросе, опускается с борта судна на глубину, определяемую дальностью действия аппаратуры. Вертикальное положение троса обеспечивается дополнительным грузом, закрепленным под целью. Расстояние между целью и грузом должно

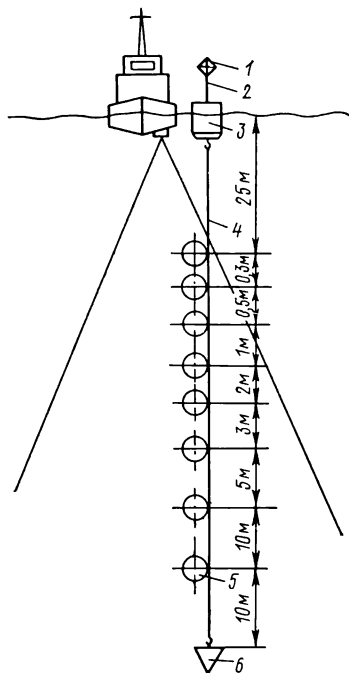


Рис. 5.6. Схема установки искусственных целей для проверки разрешающей способности поисковой аппаратуры

1 — радиолокационный уголкового отражатель; 2 — штук отражателя высотой ~ 3 м; 3 — свободно плавающий буй; 4 — трос; 5 — искусственные цели; 6 — груз

быть значительно больше величины разрешающей способности проверяемой аппаратуры и составлять не менее 5м. Цель с грузом удерживается на заданной глубине свободно плавающим буйем, состоящим из поплавка и сигнальной вежи с флажком или радиолокационным отражателем. Схема постановки искусственной цели приведена на рис. 5.4. Регистрация цели производится по индикаторам проверяемой аппаратуры при прохождении судна в непосредственной близости от сигнального буя со скоростью, указываемой в программе. В районе испытаний должны отсутствовать сильные подводные течения, вызывающие снос цели. Для уверенного акустического эхоконтакта с целью первоначально ее регистрацию рекомендуется производить при малых скоростях судна.

**Проверка дальности действия и точности пеленгования гидролокаторов горизонтального лоцирования.** Проверка производится по искусственной цели, в качестве которой используется уголкового отражатель с эквивалентным радиусом  $R_z$ , оговоренный в программе испытаний или ТУ. Установка цели аналогична установке сферы для проверки дальности действия аппаратуры вертикального действия. Схема уста-

**Проверка разрешающей способности** \* производится на стопе судна путем пеленгования подвешенных на тросе искусственных целей — пустотелых металлических сфер диаметром  $\sim 0,2$  м на различных расстояниях, как показано на рис. 5.6. Определение разрешающей способности осуществляется по индикаторам проверяемой аппаратуры и соответствует значению минимального расстояния, при котором пеленгуемые цели регистрируются раздельно.

## Глава 6

### ПРИМЕР РАСЧЕТА ГИДРОЛОКАТОРА МАЛОТОННАЖНОГО СУДНА

#### § 6.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ (ТЗ)

1. Назначение и область применения
  - 1.1. Рыболовский гидролокатор (наименование) предназначен для оснащения малотоннажных судов, ведущих промысел в любых районах Мирового океана, за исключением покрытых льдами. Предназначен для обнаружения пелагических и придонных рыбных скоплений и определения их координат при максимальной скорости судна и волнении моря до 4 баллов. Документация на типовые суда представляется заказчиком.
  - 1.2. Гидролокатор предназначен для замены эхолотов, выполнявших функции поиска рыбы на малотоннажных судах.
2. Основные технические требования
  - 2.1. В качестве устройств индикации и регистрации объектов промысла в состав аппаратуры гидролокатора должны входить электронный индикатор и самописец. Приборы приемно-усилительного тракта и управления должны устанавливаться в ходовой рубке.
  - 2.2. Энергетическая дальность действия гидролокатора при уровне в месте установки антенны суммарной акустической помехи, приведенной к стандартным условиям (частоте 1 кГц, полосе пропускания 1 Гц и коэффициенту концентрации 1),  $-0,1$  Па должна быть: — по рыбным скоплениям в пелагиали (при радиусе эквивалентной сферы  $R_{э0} = 2,0$  м) 600 м; по одиночной рыбе в придонном слое (при  $R'_{э0} = 0,1$  м) 200 м. Здесь  $R_{э0}$  дается из расчета на частоту 30 кГц.
  - 2.3. Вероятность обнаружения должна быть не менее 0,8 при вероятности присутствия сигнала 0,4.
  - 2.4. Сектора обзора акватории: в азимутальной плоскости относительно ДП судна  $\pm 165^\circ$ , в угломестной  $0-90^\circ$  (в направлении дна).

---

\* Разрешающая способность ПА определяется наименьшим расстоянием между двумя объектами, при котором данные объекты могут быть раздельно зарегистрированы индикатором или регистрирующими устройствами. Различают разрешающую способность по дистанции (или глубине) и углу. В последнем случае разрешающая способность определяется минимальным углом, при котором эхосигналы от объекта будут воспроизводиться раздельно. Разрешающая способность по углу может быть выражена и в единицах расстояния  $r$  для большей наглядности и удобства при оценке. В этом случае она называется тангенциальной разрешающей способностью  $\delta_{tg}$  и связана с угловой  $\delta_\gamma$  равенством  $\delta_{tg} = \delta_\gamma r$ . Понятие разрешающей способности ПА вертикального действия по углу имеет смысл лишь при движении судна, на котором установлена аппара-

- 2.5. Точность определения координат объектов промысла в режиме наведения по азимуту и углу места не менее  $5^\circ$ . В режиме поиска допускается меньшая точность пеленгования.
- 2.6. Питание должно осуществляться от судовой сети: однофазным переменным током напряжением  $220 \pm 10\%$  В частотой 50 Гц и постоянным током напряжением 12 и 24 В.
- 2.7. Климатические и механические требования, последовательность и методы испытаний — в соответствии с действующим ГОСТом (ОСТом).
- 2.8. Дополнительные технические требования:
  - 2.8.1. В составе усилительного тракта должны быть системы: временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) и «Белая линия».
  - 2.8.2. Разрешающая способность системы «Белая линия» должна обеспечивать обнаружение придонной рыбы, находящейся на расстоянии 1 м от грунта.
  - 2.8.3. Отсчет дистанции по шкалам индикаторов должен быть прямым без дополнительных вычислений.
- 2.9. Антенна должна располагаться на подъемно-выдвижном устройстве (ПВУ). ПВУ должно обеспечивать заглубление антенны на 0,6—0,8 м ниже кила. В нерабочем положении антенна должна убираться в шахту, находящуюся внутри корпуса судна. Управление движениями антенны должно быть дистанционным автоматическим и ручным.
3. Эстетические и эргономические требования
- 3.1. Выполнение приборов должно соответствовать требованиям технической эстетики и инженерной психологии (соответственно стилю, художественному вкусу, отделке, удобству обслуживания, целесообразности компоновки и т. п.).
4. Требования безопасности
- 4.1. Сопротивление изоляции токоведущих цепей относительно корпусов приборов должно быть не менее 20 МОм.
- 4.2. Доступ к токоведущим частям схемы гидролокатора может осуществляться только после вскрытия крышек приборов. После каждого вскрытия ни один незащищенный проводник не должен находиться под высоким напряжением по отношению к другим проводникам и корпусам.
5. Требования к унификации и стандартизации
- 5.1. Приборы, узлы и блоки должны быть максимально унифицированы и стандартизованы.
- 5.2. Средние значения показателей уровня стандартизации и унификации должны быть не менее: по коэффициенту применяемости — 80, по коэффициенту повторяемости — 35.
6. Требования к надежности
- 6.1. Нарботка на отказ должна быть не менее 600 ч. За критерий отказа считать одновременное отсутствие информации на самописце и электронном индикаторе.
- 6.2. Среднее время восстановления неисправности не более 0,5 ч.
- 6.3. Срок службы гидролокатора 10 лет, в течение 5 лет без капитального ремонта.
7. Требования к транспортированию и хранению
- 7.1. Должна быть предусмотрена возможность транспортирования упакованной аппаратуры гидролокатора любым транспортом.
- 7.2. Гидролокатор должен храниться в помещениях с температурой окружающего воздуха от  $-10$  до  $+40$  °С и относительной влажности не более 90 %. Во время хранения переконсервация раз в 6 месяцев.
8. Экономические показатели
- 8.1. Лимитная цена должна быть не более 15 000 руб.
- 8.2. Годовая потребность 30 шт.
- 8.3. Экономическую эффективность гидролокатора следует определять из условия увеличения обследуемой площади в единицу времени.
9. Стадии и этапы разработки
- 9.1. Этапы и сроки разработки определяются договором с заказчиком.
- 9.2. Приемка этапов работы производится межведомственной комиссией. Документация представляется членам комиссии за 20 дней до защиты этапа.

## § 6.2. АНАЛИЗ ТЗ. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГИДРОЛОКАТОРА И ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА \*

Гидролокатор предназначен для оснащения малотоннажных судов. Типовые характеристики таких судов приведены в табл. 6.1. Из проектной документации на суда следует: специалист по обслуживанию гидроакустической аппаратуры не предусмотрен, работа с гидролокатором осуществляется штурманом или капитаном. Промысел ведется в прибрежных районах и внутренних водоемах на глубинах от 20 до 300 м круглый год (в условиях, исключающих ледовую обстановку). Автономность плавания не более трех суток. Промвооружение позволяет вести пелагический и придонный лов. При волнении 4 балла предельные амплитуды бортовой и килевой качки 20 и 5°. Период качки 3—5 с. На нерегулярном волнении возможен слеминг, сопровождающийся вибрацией корпуса. Порты базирования судов мелководные с глубиной до 2 м. Портовые электронavigационные мастерские не оснащены необходимым оборудованием для ремонта и настройки гидроакустической аппаратуры.

Таблица 6.1. Характеристики малотоннажных судов

Основные характеристики	Типы судов				
	МРТР-300 типа «Каре-лия»	МРТР типа «Налаंगा»	МРТК типа «Балтика»	СТБК-300 типа «Селга»	СТБ типа «Смена»
Длина наибольшая, м	31,64	35,72	25,45	23,57	20,86
Ширина на миделе, м	7,18	8,80	6,8	5,6	5,5
Осадка в грузу, м	2,74	3,38	2,4	2,2	1,94
Скорость полного хода, уз	9,0	10,6	9,5	9,7	8,5
Напряжение бортовой сети, В	380/220	380/220	380/220	220	220

Продолжение табл. 6.1

Основные характеристики	Типы судов				
	СЧС-150	МРС-225	МРС-150 «Нельма»	РС-300	МСТБ-150 (морской траулера бот)
Длина наибольшая, м	25,23	23,72	22,0	33,97	17,56
Ширина на миделе, м	5,63	6,0	5,5	7,09	4,27
Осадка в грузу, м	2,24	1,93	1,75	2,77	1,43
Скорость полного хода, уз	9,0	11,0	9,1	9,0	8,7
Напряжение бортовой сети, В	220	220	220	220	24

Анализ ТЗ и сведения о судах позволяют обосновать принципиальную схему гидролокатора и исходные данные для расчета его электроакустических параметров.

\* Приводятся в пояснительной записке эскизного проекта.

Аппаратура должна быть простой в эксплуатации. Этим требованиям удовлетворяет гидролокатор с однолепестковой; ХН антенны. Приборы гидролокатора целесообразно выполнить в виде отдельных навесных на переборки конструкций. Индикаторные, регистрирующие устройства, блоки управления и контроля следует конструктивно объединить в одном приборе 1. В целях упрощения процессов ремонта и настройки однотипные функциональные блоки и узлы приборов удобно выполнить механически и электрически взаимозаменяемыми на разъемах с подстроечными элементами и контрольными гнездами для проверки параметров измерительными приборами. С целью исключения повреждения поворотной-выдвижной устройства 2 антенны 4 при швартовке должна быть предусмотрена автоматическая система аварийной звуковой сигнализации, срабатывающая при отключении гидролокатора

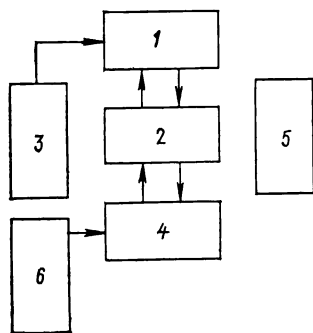


Рис. 6.1. Структурная схема гидролокатора

при опущенной антенне. Структурная схема однолепесткового гидролокатора может быть выполнена в виде, представленном на рис. 6.1.

Необходимость обнаружения объектов промысла в акваториях с незначительными глубинами выдвигает дополнительные требования к приборам гидролокатора.

1. Как указывалось ранее (см. 1.2.7), длительность зондирующего импульса определяет разрешающую способность и уровень объемной реверберационной помехи. В рыболокации увеличение уровня объемной реверберации, образующейся от отдельных особей, составляющих рыбное скопление, приводит к увеличению силы цели. Поэтому целесообразно предусмотреть три длительности импульса: 0,75; 1,0; 20 мс. При длительности импульса 0,75 и 1,0 мс разрешающая способность гидролокатора, приблизительно определяемая из соотношения  $\Delta h \leq 0,75 \tau$ , м, соответственно составляет 0,56 и 0,75 м, что отвечает

требованиям ТЗ по обнаружению в режиме эхолотирования придонной рыбы, находящейся на расстоянии 1,0 м от грунта. В мелководных районах плотные концентрации образуют лишь рыбы малых размеров. Из практики эксплуатации рыбопоисковой аппаратуры аналогичного типа вытекает, что длительности зондирующих импульсов в этих условиях ограничиваются по верхнему пределу уровнем помех, обусловленных донной и поверхностной реверберацией, а по нижнему пределу — падением силы цели и соответственно составляют обычно 10—30 мс. Выбираем среднюю величину — 20 мс.

2. Для снижения уровня помех, обусловленных донной и поверхностной реверберацией, при работе гидролокатора на малых дистанциях необходимо предусмотреть градацию выходных мощностей генераторного устройства в соотношении: 1,0; 0,1.

3. По ТЗ точность пеленгования по азимуту и углу места в режиме наведения не менее  $5^\circ$ , следовательно, ХН должна быть симметричной и не более  $10^\circ$  шириной (точность пеленгования с некоторым приближением определяется половиной угла раствора ХН). Узкая ХН ограничивает время обзора акватории, поэтому целесообразно произвести анализ возможности ее расширения. Поскольку в ТЗ задана дальность действия локатора  $r = 600$  м при малой глубине места  $H = 40$  м, в первую очередь необходимо рассмотреть угломестную ХН. Ширина ее основного лепестка должна быть такой, чтобы исключалось облучение дна на максимальной заданной дистанции семидесятипроцентным уровнем. Угол раствора определяется формулой:  $\Delta \theta_{\text{М},0,7} \leq 2 \arctg H/r = 2 \arctg 40/600 = 7,6^\circ \approx 8^\circ$ .

В азимутальной плоскости необходимо иметь ХН с разными углами раствора основного лепестка. В режиме наведения  $\sim 8^\circ$ , как и в угломестной плоскости. В режиме поиска для сокращения времени обзора акватории в широком секторе прием допустимым трехкратное расширение основного лепестка, т. е.  $\sim 24^\circ$ . Локатор должен обеспечивать пеленгование рыбы при эквивалентном радиусе цели  $R_3 = 0,1$  м в придонном слое с глубиной места не более 200 м.

В связи с этим необходимо определить уровень боковых лепестков ХН для исключения маскировки объектов поиска сигналами от дна по боковым полям. Наихудшие условия соотношения сигнал/помеха по основному и боковому лепесткам создаются при вертикальном лоцировании и максимальной глубине. В соответствии с [9] допустимый уровень боковых лепестков при этом определяется формулой  $\sigma = \sqrt[4]{R_a^2 / (H^2 \mu(\theta))} = \sqrt[4]{0,1 / (200^2 \cdot 0,2)} = 0,033$ . Так как пеленгование в большинстве случаев производится на фоне илистых и песчаных грунтов, коэффициент отражения  $\mu(\theta)$  принимаем равным 0,2. При работе на фоне скалистого грунта с  $\mu(\theta) = 0,6$  глубина локации не будет превышать величину 150 м.

5. К основным видам промысла относятся рыбы длиной: 0,15—0,20 м, в пелагиали, 0,3—0,5 — в придонном слое. Согласно табл. 1.6 максимальная скорость перемещения рыб таких размеров не превышает 3 уз (крейсерская в течение 1 ч — 2,2 уз).

6. Угловая скорость вращения антенны определится из выражения (1.13). В азимутальной плоскости при  $\Delta\theta_a = 24^\circ$   $\omega = [\Delta\theta_a c / 2r] (1-K) = [(24 \cdot 1500) / (2 \cdot 600)] (1-0,5) = 15^\circ/\text{с}$ ; при  $\Delta\theta_a = 8^\circ$   $\omega = 5^\circ/\text{с}$ . В угломестной плоскости при  $\Delta\theta_m = 8^\circ$   $\omega = [\Delta\theta_m c (1-K)] / 2r = [(8 \cdot 1500) / (2 \cdot 600)] (1-0,5) = 5^\circ/\text{с}$ . Коэффициент перекрытия ХН  $K$  принимаем равным 0,5.

7. По условиям эксплуатации максимальные амплитуды бортовой и килевой качки судна соответственно равны 20 и 7°. Поскольку точность пеленгования задана 5°, а ширина ХН принята равной 8°, необходима ее стабилизация в пространстве 6.

8. По ТЗ питание гидролокатора должно осуществляться однофазным переменным током напряжением 220 В частотой 50 Гц или постоянным током напряжением 12 и 24 В.

В связи с тем, что большинство судов, на которых будет устанавливаться гидролокатор, имеют бортовую сеть переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц, приборы и системы гидролокатора целесообразно рассчитывать на такое питание. Для судов с бортовой сетью постоянного тока 12 и 24 В в состав гидролокатора необходимо дополнительно включить преобразователь напряжения 5 (что отметить в ведомости на поставку).

9. Нормы и виды механических и климатических воздействий, которые должны учитываться при проектировании гидролокатора, определяются условиями его эксплуатации, хранения и транспортирования. В соответствии с действующим ОСТом аппаратура, размещаемая в закрытых помещениях и устанавливаемая на судах, имеющих слеминг, должна быть подвергнута следующим механическим и климатическим испытаниям (табл. 6.2).

Обобщенные исходные данные для расчета основных электроакустических параметров гидролокатора, принятые обозначения и размерности сведены в табл. 6.3.

### § 6.3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОКАТОРА

1. Рабочая (резонансная) частота по формуле (1.13)  $f_0 = 39/r^{2/3} = 39/0,6^{2/3} = 54,9 \approx 55$ , кГц, длина волны  $\lambda = c/f_0 = (1,5 \cdot 10^3) / (55 \cdot 10^3) = 2,7 \cdot 10^{-2}$  м

2. Параметры антенн

2.1. Антенна наведения. Симметричная ХН для точного пеленгования с углом раствора основного лепестка 8° может быть сформирована плоской антенной с круглым раскрывом. Для обеспечения требуемого уровня боковых лепестков  $\sigma_n$  не более 3 % в радиальном направлении по апертуре антенны в соответствии с табл. 2.2 (строка 19) вводим спадающее от центра к периметру амплитудное распределение, пропорциональное функции

$$[1 - (2\rho/D)]^2.$$

2.1.1. Диаметр апертуры (см. гл. 2, табл. 2.2)

$$D_{\text{нм}} = D_{\text{на}} = (84,2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}) / 8 = 0,284 \text{ м.}$$

2.1.2. Площадь апертуры

$$S_{\text{н}} = (\pi D^2) / 4 = 3,14 (0,284)^2 / 4 = 0,0633 \text{ м}^2.$$

Таблица 6.2. Перечень и нормы климатических и механических испытаний

Вид испытаний	Нормы испытаний	
	в рабочем состоянии	после воздействия (при нормальных климатических условиях)
На брызгозащищенность (с целью проверки устойчивости параметров гидролокатора после воздействия дождя)		Искусственного дождя в течение 10 мин с равномерной интенсивностью выпадения осадков 3 мм в 1 мин. под углом 15° к вертикали и одновременно сверху
На вибропрочность (с целью выявления грубых технологических дефектов производства)		Вибрации с частотой 10 Гц и ускорением 10 м/с <sup>2</sup> продолжительностью 30 мин
На виброустойчивость (с целью проверки способности аппаратуры выполнять свои функции и сохранять параметры в условиях вибрации)	При вибрации поочередно в трех взаимно перпендикулярных положениях с частотой 10 Гц, амплитудой 1,4 мм, продолжительностью 1 ч	
На удароустойчивость (с целью проверки способности аппаратуры выполнять свои функции и сохранять параметры в условиях действия ударных нагрузок)		При ударах поочередно в трех взаимно перпендикулярных положениях с частотой удара платформы стенда 40 ÷ ÷ 80 уд./мин с ускорением 70 м/с <sup>2</sup> в течение 10 мин
На теплоустойчивость (с целью определения способности аппаратуры выполнять свои функции и сохранять параметры в условиях повышенной температур)	При температуре 40 ± 2,0 °С в течение 10 ч	При температуре 55 ± ± 2 °С в течение 6 ч
На холодоустойчивость (с целью определения способности аппаратуры сохранять свои параметры в условиях низких температур)	При температуре 0 ± 1 °С в течение 3 ч	При температуре -50 ± 3 °С в течение 2 ч



Вид испытаний	Нормы испытаний	
	в рабочем состоянии	после воздействия (при нормальных климатических условиях)
На влагоустойчивость (с целью определения способности аппаратуры сохранять свои параметры и внешний вид в условиях воздействия повышенной влажности)		При температуре $+40 \pm 2^\circ\text{C}$ , относительной влажности 95,0—98,0 % в течение 10 сут
На коррозионную стойкость (с целью определения коррозионной стойкости материалов и покрытий, применяемых при изготовлении гидролокатора)		При температуре $+27 \pm 2^\circ\text{C}$ , морском тумане в течение 2 сут

2.1.3. Коэффициент концентрации (см. гл. 2, табл. 2.2)

$$K_n = (0,55 \cdot 4\pi S_n) / \lambda^2 = (0,55 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 6,33 \cdot 10^{-2}) / (2,7 \cdot 10^{-2})^2 = 600.$$

2.2. Антенна поиска. В угломестной плоскости угол раствора основного лепестка сохраняется  $8^\circ$ . В азимутальной плоскости угол раствора основного лепестка задан  $24^\circ$ . В связи с этим антенна становится прямоугольной, ориентированной большим размером по вертикали. Специального уменьшения боковых лепестков в азимутальной плоскости не требуется. При сохранении по большему размеру апертуры принятого амплитудного распределения в угломестной плоскости первые боковые лепестки ХН в соответствии с табл. 2.2 будут равны 3,7 %. Угол раствора основного лепестка в этой плоскости определяем, пользуясь формулой

$$\Delta\theta_{0,7п.м} = 77,9\lambda / D_{п.м} = (77,9 \cdot 2,7 \times 10^{-2}) / (2,84 \cdot 10^{-1}) = 7,4^\circ.$$

2.2.1. Размер апертуры в азимутальной плоскости. У антенны наведения по радиусу введено амплитудное распределение. С целью исключения дополнительных устройств коммутации по азимутальному размеру (горизонтالي) апертуры антенны поиска целесообразно амплитудное распределение сохранить. Части антенны при этом с обеих сторон от вертикальной полосы просто отключаются. Поскольку угол раствора основного лепестка в азимутальной плоскости в три раза шире, чем в угломестной, ширина антенны по горизонту окажется меньшей (не менее чем в три раза). Для предварительной оценки этого числа найдем горизонтальный размер в предположении равномерного амплитудного распределения. Пользуясь формулой  $\Delta\theta_{0,7} = (50,5\lambda) / D$ , (см. табл. 2.1) находим  $D_{п.а} = (50,5 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}) / 24 = 0,057$  м. Если обратиться к рис. 6.2, можно видеть, что при размере  $D_{п.а} = 0,06$  м отношение  $2x/D$  окажется равным

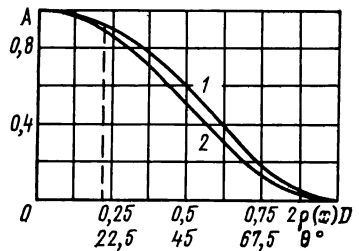


Рис. 6.2. К определению размеров антенны с амплитудными распределениями

1 — вида  $[1 - (2\rho/D)^2 \text{ или } x^2]^2$  (см. табл. 2.2); 2 — вида косинус в квадрате — от углового размера

Таблица 6.3. Исходные данные к расчету.

Параметр	Значение	
	по ТЗ	по результатам анализа ТЗ
Дальность действия (по горизонту) $r$ , м	600	—
Дальность действия (по вертикали) $r'$ , м	200	—
Антенна точного наведения (симметричная) $\Delta\theta_{a,0,7}$ , $\Delta\theta_{m,0,7}$ , град: ширина основного лепестка боковые лепестки $\sigma_a$ (м), %	—	8 не более 3
Антенна поиска в угломестной плоскости: ширина основного лепестка $\Delta\theta_{m,0,7}$ , град боковые лепестки $\sigma_m$ , % в азимутальной плоскости: ширина основного лепестка $\Delta\theta_{a,0,7}$ , град боковые лепестки $\sigma_a$ , %	— — — —	8 не более 3 24 не более 22
Радиус эквивалентной сферы (на частоте 30 кГц): рыбных скоплений $R_{э0}$ , м одиночной рыбы $R'_{э0}$ , м	2 0,1	—
Скорость пеленгующего судна $v_1$ , уз	—	10
Скорость объектов промысла $v_2$ , уз	—	3
Длительность зондирующего импульса $\tau$ , мс	—	0,5; 1,0; 20,0
Уровень помех, приведенных к стандартным условиям $P_{по}$ , Па	0,1	—
Вероятность правильного обнаружения $q$	0,8	—
Вероятность присутствия $P$	0,4	—

0,06/0,284 = 0,21. Восстанавливая перпендикуляр из точки 0,21 на оси абсцисс до пересечения с кривой 1, убеждаемся, что уменьшение амплитуды возбуждения на горизонтальном краю антенны поиска практически несущественно и составляет примерно 10 % (пьедестал  $\Delta = 0,9$ ). Из табл. 2.2 видим, что для нахождения параметров  $D_{п.а}$  и  $\sigma_{п.а}$  при  $\Delta = 0,9$  можно воспользоваться среднеарифметическими значениями. Тогда:  $D_{п.а} = [1/2 (50,5 + 53,8)]/0,7 = (52,15 \cdot 2,7 \cdot 10^{-2})/24 = 0,06$  м;  $\sigma_{п.а} = (0,22 + 0,16)/2 = 0,19$

2.2.2. Площадь апертуры  $S_{п} = D_{п.а} D_{пм} = 0,284 \cdot 0,06 = 0,017$  м<sup>2</sup>.

2.2.3. Коэффициент концентрации

$$K = 0,995 \cdot 0,68 \cdot (4\pi S_{п})/\lambda^2 = (0,677 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,017)/(2,7 \cdot 10^{-2})^2 = 198,4 \approx 190.$$

3. Отражательная способность объекта пеленгования — радиус эквивалентной сферы  $R_э$  на рабочей частоте гидролокатора (см. гл. 1, § 1.2.4). Для

рыбных скоплений  $R_э = R_{э0} \sqrt{f_0/f_{30}} = 2 \sqrt{55/30} = 2,7$  м. Для одиночных рыб  $R_э = R_{э0} \sqrt{f_0/f_{30}} = 0,1 \sqrt{55/30} = 0,135$  м

4. Полосу пропускания приемно-усилительного тракта  $\Delta F$  определяем по формуле (1.14). Обусловленная эффектом Доплера:  
 $\Delta f_D = 4f_0 (v_1 + v_2)/c = 4 \cdot 55 \cdot 10^3 (5 + 1,5)/(1,5 \cdot 10^3) = 952,6$  Гц.  
 Обусловленная длительностью импульса  $\Delta f_\tau = 1/0,75 \cdot 10^{-3} = 1333$  Гц.

Величину полосы пропускания, обусловленную нестабильностью передающего и приемного трактов гидролокатора, принимаем равной  $\Delta f_{г\gamma} = 50$  Гц. Тогда  $\Delta F = \Delta f_D + \Delta f_\tau + \Delta f_{г\gamma} = 952,6 + 1333 + 50 = 2335$  Гц.

5. По ТЗ уровень помех в месте установки антенны задан приведенным к стандартным условиям:  $f = 1$  кГц,  $\Delta f = 1$  Гц,  $K = 1$ . Для гидролокатора с  $f_0 = 55$  кГц,  $F = 2335$  Гц уровень помех поискового режима определяется из выражения (1.19)  $P_{пп} = P_{по}/f_0 \sqrt{\Delta F/K} = Q,1/55 \sqrt{2335/190} = 0,0064$  Па — в поисковом режиме при  $K = 190$ ;  $P_{пн} = 0,004$  Па — в режиме наведения при  $K = 600$ .

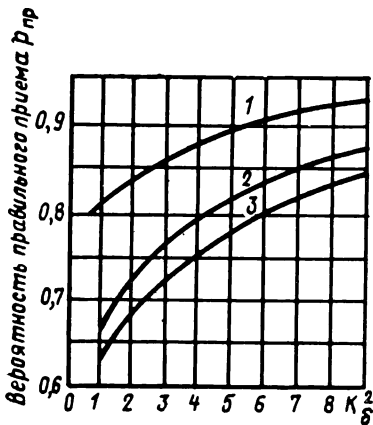


Рис. 6.3. К определению коэффициента надежности приема —  $K_б$   
 1 —  $P = 0,2$ ; 2 —  $P = 0,4$ ; 3 —  $P = 0,6$

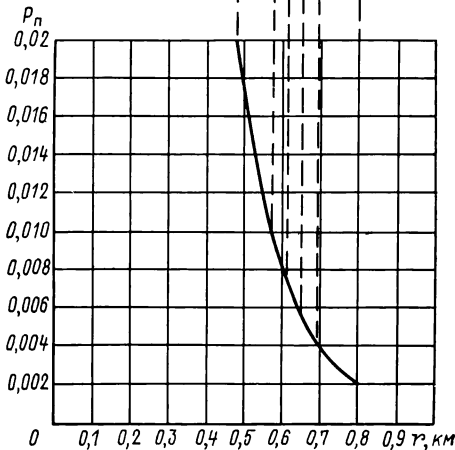
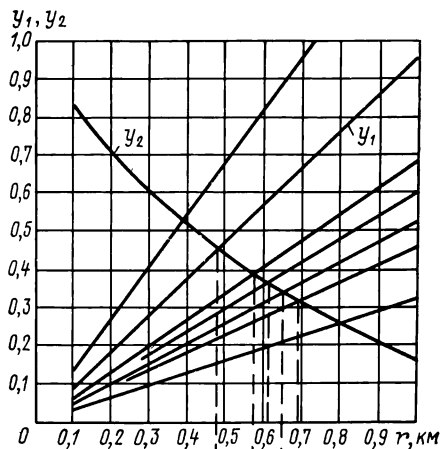


Рис. 6.4. К решению трансцендентного уравнения

- 6 Коэффициент пространственного затухания (см. 1.2.6)  $\beta = 0,036 f_0^{1,5} = 0,036 \cdot 55^{1,5} = 14,7$ , дБ/км.
7. Коэффициент распознавания (для одноканальной системы (см. 1.2.8)  $\delta = (\sqrt{2}K_б)/\sqrt{\Delta FT} = (\sqrt{2} \cdot 2)/\sqrt{2335 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}} \approx 2,2$ , где  $K_б$  — коэффициент надежности приема, определяемый из графика, приведенного на рис. 6.3, для значений  $q = 0,8$  и  $P = 0,4$ ;  $T$  — время усреднения сигнала (принимаем равным минимальной длительности зондирующего импульса  $T = \tau = 0,75 \cdot 10^{-3}$  с).

8. Акустическая мощность гидролокатора, необходимая для поиска в пелагиали на дистанции до  $z = 600$  м (при отражательной способности цели  $R_3 = 2,7$  м; уровне помех в месте установки антенны  $P_{\text{п}} = 0,0064$  Па; коэффициенте концентрации  $K = 190$ ; длительности зондирующего импульса  $\tau = 0,75 \cdot 10^3$  с; коэффициентах распознавания  $\delta = 2,2$  и затухания  $\beta = 14,7$  дБ/км) определится из выражения (1.12).

$$W_a = \frac{\delta^2 P_{\text{п}}^2 16\pi^4}{R_3^2 (\rho c)_B K} \cdot 10^{0,2\beta \cdot r} = \frac{(2,3)^2 (0,0064)^2 16\pi \cdot 600^4}{(2,7)^2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 \cdot 190} \cdot 10^{0,2 \cdot 14,7 \cdot 0,6} \approx 40 \text{ Вт.}$$

В расчете не учитывались потери энергии в кабелях и обтекатель антенны, поэтому принимаем  $W_a = 60$  Вт.

9. Электрическая мощность генераторного устройства определится по формуле  $W_3 = W_a/\eta_{3a}$ , где  $\eta_{3a}$  — электроакустический коэффициент полезного действия антенн, работающих в области резонанса, обычно лежит в пределах 40—60 %. Окончательно уточняется после расчета преобразователей, составляющих антенну. Ориентируясь на минимум, выбираем предварительно  $\eta_{3a} = 40$  %, тогда  $W_3 = W_a/0,4 = 150$  Вт.
10. Энергетическое уравнение. В практике эксплуатации гидролокаторов бывает необходимым определение основных эксплуатационных характеристик при других (отличных от указанных в ТЗ) параметрах. Делается это с помощью уравнения гидролокации

$$r^4 = [(W_a R_3^2 (\rho c)_B K) / (\delta^2 P_{\text{п}}^2 16\pi)] \cdot 10^{-0,2\beta r}$$

Так, например, энергетическая дальность действия (рассчитанная в соответствии с требованиями ТЗ) гидролокатора в условиях воздействия помехи, отличной от 0,1 Па (принятой в расчетах), при неизменных значениях других параметров может быть определена в результате графического решения трансцендентного уравнения (см. § 1. 2. 7)  $r = \sqrt[4]{A/p_{\text{п}}^2} \cdot 10^{-0,05\beta r}$ , где

$$\begin{aligned} A &= (W_a R_3^2 (\rho c)_B K) / (\delta^2 16\pi) = 60 (2,7)^2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 \cdot 190 / (2,3)^2 \cdot 16 \cdot \pi = \\ &= 469 \cdot 10^6 = \text{const}; \quad y_1 = (r \sqrt{P_{\text{п}}}) / B; \quad y_2 = 10^{-0,05\beta r}; \quad B = \sqrt[4]{A} = \\ &= \sqrt[4]{469 \cdot 10^6} = 147 \text{ (см. рис. 6.4)}. \end{aligned}$$

## § 6.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

По условиям ТЗ и результатам его анализа в состав гидролокатора должны входить: электронный и электромеханический индикаторы, усилитель с блоками ВАРУ и «Белая линия», генератор, коммутатор, антенна и обтекатель к ней, система поворотного-выдвижного устройства (ПВУ), устройство стабилизации характеристики направленности антенны, источник питания. Конструктивно индикаторы и все органы управления и контроля гидролокатора должны быть объединены в одном приборе. Разработка этих приборов и устройств, как отмечалось ранее, осуществляется специализированными отделами (лабораториями) по ТЗ главного конструктора изделия.

ТЗ специализированным отделам должны содержать разделы: назначение и область применения устройства, основные технические и конструктивные требования, требования по изготовлению и обслуживанию, технике безопасности, надежности, унификации и стандартизации, эстетике и инженерной психологии, воздействию механических и климатических факторов. За исключением технических и конструктивных, требования аналогичны между собой и в основном повторяют требования ТЗ на изделие. В заключительной части каждого ТЗ приводится перечень необходимой документации, подлежащей разработке. В ее состав включаются: описание прибора (устройства), принципиальная, монтажная и электрическая схемы, проект технических условий (ТУ), инструкции по настройке, регулировке, эксплуатации и ремонту, программы и методики

испытаний, расчет показателей надежности, унификации и стандартизации, сведения по исследованию на патентную чистоту, чертежи, отчет о разработке. В ТЗ оговариваются сроки и трудоемкость разработки. Составленные группой главного конструктора ТЗ согласовываются с разработчиком и утверждаются руководителем отделения или предприятия. Ниже приводится пример технического задания на антенны и ее расчет.

### Техническое задание на проектирование антенны

1. Назначение и область применения. Антенна предназначена для работы в составе морского поискового гидролокатора малотоннажного судна. Она должна работать в режимах излучения и приема. Устанавливается на выдвижном поворотном устройстве, обеспечивающем вращение антенны по азимуту и углу места и стабилизацию ее в пространстве при качке судна.
2. Технические требования
  - 2.1. Рабочая частота 55 кГц.
  - 2.2. Параметры ХН.
    - 2.2.1. Ширина основного лепестка на уровне 0,7 по давлению: а) в азимутальной плоскости  $\Delta\theta_a = \sim 24^\circ$  и  $\sim 8^\circ$ ; б) в угломестной плоскости  $\Delta\theta_m = \sim 8^\circ$ .
    - 2.2.2. Уровень боковых лепестков  $\sigma$ : а) в азимутальной плоскости не более 22 %; б) в угломестной плоскости  $\sim 3$  %.
  - 2.3. Максимально допустимые габариты и масса: 0,4 м и 30 кг.
  - 2.4. Акустическая мощность не менее 60 Вт при напряжении возбуждения не более 400 В, длительностях зондирующих импульсов 0,5; 1 и 20 мс.
  - 2.5. Потребляемая электрическая мощность не должна превышать 200 Вт.
  - 2.6. Чувствительность на рабочей частоте не менее 1000 мкВ/Па.
  - 2.7. Полоса пропускания  $\Delta F$  не менее 2300 Гц.
  - 2.8. Электрическая емкость канала не менее 300 пФ.
  - 2.9. Антенна должна работать при заглублении 2 м.
  - 2.10. Механические и климатические требования — в соответствии с общепринятыми нормами на рыбопоисковую аппаратуру.
3. Работа по заданию заканчивается.
  - 3.1. Разработкой технической документации: отчета, проекта технических условий, инструкции по настройке, электрической схемы;
  - 3.2. Составлением и согласованием технического задания на конструирование.

### § 6.5. РАСЧЕТ АНТЕННЫ

1. Определение габаритов антенны в азимутальной и угломестной плоскостях и расчет направленных свойств. Осуществляется по заданным частоте, углам раствора основного лепестка и уровню боковых лепестков ХН. Производится это точно так же, как изложено в § 6.3.

По результатам расчета получено. Для антенны наведения: горизонтальный и вертикальный размеры (диаметр, антенна симметричная)  $D_{на} = D_{им} = 0,284$  м, площадь апертуры  $S_n = 0,0633$  м<sup>2</sup>, коэффициент концентрации  $K_n = 600$ , угол раствора основного лепестка  $\Delta\theta_{на} = \Delta\theta_{им} = 7,4^\circ$ . В радиальном направлении вводится амплитудное распределение, соответствующее функции  $[1 - (2\rho/D)^2]^2$ . При этом обеспечивается уровень максимальных боковых лепестков, равный 3 %. Для антенны поиска: горизонтальный и вертикальный размеры антенны  $D_{па} = 0,06$  м,  $D_{пм} = 0,284$  м (антенна прямоугольная), площадь апертуры  $S_n = 0,017$  м<sup>2</sup>, коэффициент концентрации  $K_n = 190$ , углы раствора основного лепестка  $\Delta\theta_{па} = 24^\circ$ ,  $\Delta\theta_{пм} = 7,4^\circ$ . При этом обеспечиваются (амплитудное распределение не меняется, производится уменьшение размера антенны по горизонту) предельные уровни боковых лепестков  $\sigma_{па} = 19$  %,  $\sigma_{пм} = 3,7$  % (см. табл. 2.2). При необходимости можно произвести расчет текущих значений ХН с использованием формул гл. 2.

2. Выбор типа преобразователя. Нам необходимо обеспечить полосу пропускания не менее  $\Delta F = 2300$  Гц. Для обеспечения этого требования механическая добротность антенны не должна превышать величины  $Q = f_p/\Delta F =$

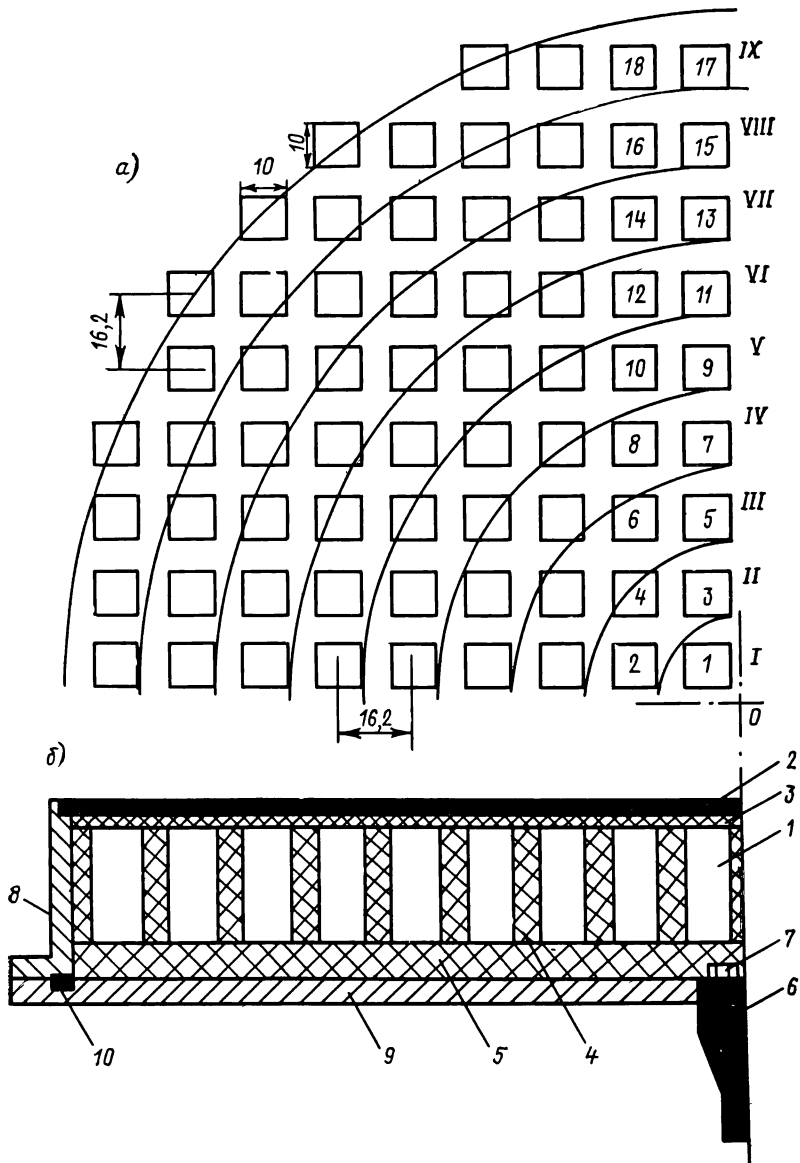


Рис. 6.5. Размещение преобразователей в антенне (а) и ее конструктивное оформление (б)

1 — преобразователь; 2 — звукопрозрачная резина; 3 — слой полиуретана; 4 — промежуточный ячеистый экран; 5 — тыльный экран; 6 — кабельный ввод; 7 — провода; 8 — корпус; 9 — крышка; 10 — уплотнение

$\approx 55000/2400 = 25$ . Такую добротность могут обеспечить полуволновые (без накладок) стержневые преобразователи. Проверяем это положение. Для этого определяем геометрию преобразователя. Выбираем наиболее эффективную пьезокерамику ЦТСНВ-1. Это возможно, поскольку предполагается сплошной несекционированный (без клеевых соединений) стержень при умеренной излучаемой мощности. Находим резонансный размер  $l$ , решая трансцендентное уравнение  $\operatorname{tg} 2\pi f_{\text{р}} l / 2c_3^D = 2\pi f_{\text{р}} l / 2c_3^D k_{33}^2$ ,  $\operatorname{tg} 2 \cdot 3,14 \cdot 55000 \cdot l / 2 \cdot 3680 = 2 \cdot 3,14 \cdot 55000 \cdot l / 2 \cdot 3680 \cdot 0,72^2$ ,  $l \approx 0,0235$  м. Поперечные размеры для обеспечения преимущественно колебательных движений вдоль резонансного размера и исключения связанных колебаний, выбираем минимум в два раза меньшим продольного. Прием квадратное сечение со стороной 0,01 м.

Теперь можно вычислить добротность. В расчетах будем оперировать параметрами одного стержня. Полученные цифры будут справедливы и для антенны, поскольку размеры апертуры составляют несколько длин волн в воде  $\lambda_{\text{в}} = c_{\text{в}}/f = (1,5 \cdot 10^8 / 5,5 \cdot 10^4) = 0,027$  м, и, следовательно, сопротивление излучения синфазно работающих преобразователей можно считать равным  $(\rho c)_{\text{в}} S_{\text{н}}$ . Итак, [см. (3.10)],

$$Q = [(\rho c_3^E) / (2 (\rho c)_{\text{в}})] \eta_{\text{ам}} = (3,14 \cdot 7,3 \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3 \cdot 0,8) / (2 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^8) = 22,5.$$

3. Размещение преобразователей и конструктивное оформление антенны. На рис. 6.5 показана схема размещения преобразователей в  $1/4$  части антенны поиска (два вертикальных правых ряда) и наведения. Количество преобразователей соответственно 72 и 276. Расстояние между центрами преобразователей взято равным 16,2 мм из расчета 6 мм на промежуточный экран и 0,2 мм — технологический зазор. При этом  $D_{\text{на}} = D_{\text{нм}} = 285,4$  мм по активной части антенны. На этом же рисунке показаны концентрические окружности. По преобразователям, большая часть сечений которых попадает в соответствующее концентрическое кольцо, вводим одинаковое амплитудное распределение, уменьшающееся от центра к периметру с шагом, равным ширине кольца по выбранному ранее закону.

4. Проверка допустимости удельной мощности. Наибольшая удельная акустическая мощность будет развиваться поисковой антенной, имеющей меньшую площадь:  $W_{\text{ауд}} = W_{\text{а}}/72 S_{\text{пр}} = 60/(72 \cdot 1 \cdot 1) = 0,85$  Вт/см<sup>2</sup>, где  $S_{\text{пр}}$  — площадь излучающей поверхности преобразователя, 72 — число преобразователей в антенне поиска.

По условиям отсутствия кавитации для частоты 55 кГц при длительности импульса 20 мс и средней насыщенности воды газом такая удельная мощность вполне допустима (см. рис. 3.12 данные по  $\tau$  и  $W_{\text{к}}$ ). Эта мощность допустима и из соображений обеспечения механической прочности [см. (3.13)].

5. Напряжение возбуждения. Мы выбрали сплошной полуволновый стержень из состава ЦТСНВ-1 с электродами на торцевых поверхностях (продольный пьезоэффект). Расчет ведем на один преобразователь, формулы (3.16), (3.19):  $U_{\text{рэф}} = \sqrt{(r_s W_{\text{ар}}) / (\eta_{\text{ам}} n)} = \sqrt{(1,5 \cdot 10^{20} \cdot 0,85) / (0,8 \cdot 0,08)} = 177$  В, где коэффициент трансформации (см. рис. 3.13, з)  $n = d_{33} Y_{33}^D ab/l = 40 \cdot 10^{-11} \cdot 0,49 \times 10^{11} [(1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2}) / (2,4 \cdot 10^{-2})] = 0,08$  [см. (3.21)] сопротивление излучения  $r_s = (\rho c)_{\text{в}} S_{\text{пр}} = 1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 150$ . Такое напряжение возбуждения требуется при равномерном амплитудном распределении, чтобы поисковой антенной излучить мощность 60 Вт. Если обратиться к рис. 6.5, можно составить таблицу с распределением напряжений по элементам антенн. Суммарная мощность оказалась меньше заданной в  $60/23,4 = 2,6$  раза. Для увеличения излучаемой мощности необходимо повысить напряжение возбуждения в  $\sqrt{2,6} = 1,6$  раза в каждом канале (см. строку 8, табл. 6.4). При этом мощность увеличивается до требуемой величины за счет перераспределения по каналам (см. строки 9 и 10 табл. 6.4).

Определим мощность, которую можно снять с антенн наведения при тех же напряжениях возбуждения по каналам (см. строка 11, табл. 6.4).

6. Электрическая емкость. Емкость преобразователя [см. (3.27)],  $C_3 = \epsilon/\epsilon_0 (0,88 \cdot 10^{-11} ab/l) = 2250 \cdot 0,88 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2} / (2,4 \cdot 10^{-2}) = 82,5 \cdot 10^{-12} = 80 \cdot 10^{-12}$  пФ. Емкости по каналам приведены в табл. 6.4, строки 12 и 13.

Таблица 6.4. Электроакустические параметры антенны

1	Номер канала	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	$\Sigma$
2	Количество преобразователей в канале антенны поиска	4	8	12	8	8	8	8	8	8	8
3	Количество преобразователей в канале антенны наведения	4	8	20	20	28	36	40	52	68	68
4	Текущий радиус $\rho$ , см	0,82	2,44	4,06	5,68	7,3	8,92	10,54	12,16	13,78	13,78
5	$U_p/U_1$	1	0,94	0,85	0,71	0,55	0,37	0,2	0,01	0,005	0,005
6	$W_a$ одного преобразователя, Вт	0,85	0,75	0,61	0,43	0,26	0,116	0,034	0,0001	0,00002	0,00002
7	$W_a$ канала антенны поиска, Вт	3,4	6	7,3	3,44	2,1	0,93	0,27	0,0008	0,00016	$\Sigma$ 23,4
8	$U$ , В	283	266	241	201	156	105	57	3	1,5	1,5
9	$W_a$ одного преобразователя, Вт	2,18	1,93	1,59	1,1	0,66	0,3	0,09	0,00025	0,00006	0,00006
10	$W_a$ канала антенны поиска, Вт	8,75	15,44	19,08	8,8	5,28	2,4	0,72	0,002	0,0005	$\Sigma$ 60,4
11	$W_a$ канала антенны наведения, Вт	8,75	15,44	31,8	22	18,5	10,8	3,6	0,013	0,004	$\Sigma$ 129,4
12	Емкости каналов антенны поиска, пФ	320	640	960	640	640	640	640	640	640	640
13	Емкости каналов антенны наведения, пФ	320	640	1600	1600	2240	2880	3200	4160	5440	5440
14	Входные сопротивления каналов антенны поиска, Ом	1825	913	608	913	913	913	913	913	913	913
15	Входные сопротивления каналов антенны наведения, Ом	1825	913	365	365	261	203	183	140	107	107



7. Сопротивления каналов. Механическое сопротивление преобразователя на резонансе, (3.24),  $r_m = r_s/4n^2\eta_{ам} = 150/[4 \cdot (0,178)^2 \cdot 0,8] = 1485$  Ом. Сопротивление электрических потерь [см. (3.23)]  $R_{п} = 1/(2\pi f C_3 \operatorname{tg} \delta) = 1/(6,28 \cdot 5,5 \cdot 10^4 \cdot 80,3 \cdot 10^{-12} \cdot 0,019) = 1,9 \cdot 10^6$  Ом. Активное входное сопротивление преобразователя  $R_{вх} = R_{п}r_m/(R_{п} + r_m) = (1,7 \cdot 10^6 \cdot 1,485 \cdot 10^3)/(1,9 \cdot 10^6 + 1,485 \cdot 10^3) = 1,484$  Ом, Величины активных входных сопротивлений каналов представлены в табл. 6.4. строки 14 и 15.

8. Давление на оси ХН  $P \approx 350 \sqrt{W_a K}$ . Давление, развиваемое антенной поиска,  $P = 350 \sqrt{60 \cdot 190} = 37370$  Па. Давление, развиваемое антенной наведения  $P = 350 \sqrt{60 \cdot 600} = 66408$  Па при мощности, равной мощности антенны поиска, и  $P = 350 \sqrt{129,4 \cdot 600} = 69660$  Па при мощности, развиваемой антенной наведения в случае таких же величин напряжения возбуждения, как и по каналам антенны поиска.

9. Коэффициент полезного действия и потребляемая электрическая мощность [см. (3.18)]  $\eta_{эа} = \eta_{эм} \eta_{ам} = [R_{п}]/(R_{п} + r_m) \eta_{ам} = 1,9 \cdot 10^6/(1,9 \cdot 10^6 + 1,484 \cdot 10^3) \cdot 0,8 = 0,79$ .

Электрическая мощность, потребляемая антенной поиска (3.16)  $W_{эп} = W_{ап}/\eta_{эа} = 60/0,79 = 76 \approx 80$  Вт. Такая же мощность потребляется антенной наведения при излучении ею 60 Вт. Для акустической мощности 129 Вт необходима электрическая мощность 163 Вт. Следует иметь в виду, что электрическая мощность генератора должна быть увеличена для компенсации потерь в фидерах, соединяющих генератор с антенной.

10. Чувствительность в режиме приема. Чувствительность электроакустического преобразователя максимальна на частоте электромеханического резонанса. Как мы знаем, частота электромеханического резонанса тем больше отличается от частоты резонанса механического, чем эффективнее пьезоматериал, из которого преобразователь выполнен.

Расчет чувствительности можно произвести, пользуясь формулой (3.32),

$$\begin{aligned} \gamma_{пр} = & \frac{nv}{\rho c_{33}^D \omega C_3} (1 - \cos kl) \left\{ \left[ \frac{(\rho c)_{в} S_{п}}{\rho c_{33}^D S \eta_{ам}} \right]^2 \left( \cos kl + \frac{n^2 \sin kl}{\rho c_{33}^D S \omega C_3} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left[ \sin kl = \frac{2n^2}{\rho c_{33}^D S \omega C_3} (1 - \cos kl) \right]^2 \right\}^{-1/2} = \frac{0,08 \cdot 2}{7,3 \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3 \cdot 6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} \times \\ & \times \left( 1 - \cos \frac{6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 0,0215}{3,68 \cdot 10^3} \right) \left\{ \left[ \frac{1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{7,3 \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \right]^2 \times \right. \\ & \times \left( \cos \frac{6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 0,0215}{3,68 \cdot 10^3} + \frac{(0,08)^2 \sin \frac{6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 0,0215}{3,68 \cdot 10^3}}{7,3 \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} \right)^2 + \\ & \left. + \left[ \sin \frac{6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 0,0215}{3,68 \cdot 10^3} + \frac{2(0,08)^2}{7,3 \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} \right] \times \right. \\ & \times \left( 1 - \cos \frac{6,28 \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 0,0215}{3,68 \cdot 10^3} \right) \left. \right\}^{-1/2} = \frac{3,56 \cdot 10^{-1}}{7,42 \cdot 10^2} (1 + 0,432) \times \\ & \times \left\{ \left[ \frac{1,5 \cdot 10^2}{2,15 \cdot 10^3} \right]^2 \left( -0,628 + \frac{3,16 \cdot 10^{-2} \cdot 0,901}{7,42 \cdot 10^{-2}} \right)^2 + \left[ 0,901 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{6,33 \cdot 10^{-2}}{7,42 \cdot 10^{-2}} (1 + 0,432) \right]^2 \right\}^{-1/2} \approx 138 \cdot 10^{-4} \text{ В/Па} = 138 \text{ мкВ/Па}, \end{aligned}$$

где  $v = 2$  коэффициент дифракции для антенны больших волновых размеров. Расчет частотной характеристики чувствительности в области резонанса

можно выполнить с помощью формулы расстройки (3.30). В этом случае за резонансную частоту нужно взять частоту электромеханического резонанса. В случае, если антенна с равномерным амплитудным распределением, чувствительность в режиме холостого хода при параллельном включении преобразователей равна чувствительности одного преобразователя, работающего в комплексе с другими синфазно колеблющимися преобразователями. Поэтому расчет выполнен в данном случае при подстановке параметров одного преобразователя.

11. Конструкция. Как мы уже отмечали, антенна состоит из 276 стержневых несекционированных полуволновых работающих на продольном пьезоэффекте преобразователей 1 (см. рис. 6.5). Преобразователи, отмеченные номерами 1—18, составляют 1/4 часть антенны поиска. Концентрическими поясами условно обозначены границы, в пределах которых располагаются преобразователи, составляющие самостоятельный канал с единым возбуждением. Между преобразователями находится ячеистый экран 4 из пористой звукоотражающей резины, являющийся одновременно конструктивным элементом фиксации преобразователей. С тыльной стороны помещен слой 5 из звукоотражающей резины. Звукопрозрачная резина 2 привулканизирована к металлическому корпусу 8. Между этой резиной и преобразователями введен слой полиуретана 3, обеспечивающий акустический контакт преобразователей с резиной 2 и водной средой. Герметизация осуществляется крышкой 9 и уплотнительной резиной 10. Электромонтаж выполняется голым проводом, параллельно распаянным по передним и тыльным электродам преобразователей в пределах, ограниченных поясами каналов, с последующим выводом по-канально на провода 7 многожильного кабеля 6 (см. рис. 6.5).

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в книге сведения об организации проектирования гидроакустических станций флота рыбной промышленности и порядке разработки технической документации на приборы дополняют имеющиеся материалы.

Последовательное изложение методов расчета основных технико-эксплуатационных характеристик станций и параметров гидроакустических антенн позволяет целенаправленно осуществлять выбор схемы построения изделия.

Использование материалов книги дает возможность обоснованно формулировать требования к электронной аппаратуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аверкиев В. П.** Гидроакустические рыбопоисковые и навигационные приборы.— Л.: Судостроение, 1967, 215 с.
2. **Айзенберг Г. З.** Антенны ультракоротких волн.— М.: Гос. изд-во литературы по вопросам и радио, 1957.— 696 с.
3. Антарктический криль. Биология и промысел. (Атлант. НИРО).— Калининград, 1965.— 92 с.
4. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежных работ под ред. Л. С. Бененсона.— М.: Советское радио, 1966.— 368 с.
5. **Баранов В. В.** Учет рефракции звука в воде при испытании рыбопоисковых гидролокаторов на искусственных целях//Рыбное хозяйство.— 1973.— № 6, с. 42—43.
6. **Благовещенский С. Н.** Справочник по теории корабля.— Л.: Гос. изд-во судостроительной литературы, 1950.— 150 с.
7. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов.— М.: Наука, 1965.— 608 с.
8. **Вендик О. Г.** Антенны с немеханическим движением луча.— М.: Советское радио, 1965.— 360 с.
9. **Головко И. И., Сергеев С. Л.** Влияние боковых лепестков характеристики направленности антенны РПС при регистрации придонной рыбы//Рыбное хозяйство.— 1978, № 9,— С. 51—52.
10. ГОСТ 13927—80. Материалы пьезокерамические. Технические условия.— М.: изд-во Стандартов, 1980,— С.
11. ГОСТ 22613—77. Система «человек—машина». Выключатели и переключатели поворотные. Общие эргономические требования.
12. ГОСТ 22614—77. Система «человек—машина». Выключатели и переключатели типа «тумблер». Общие эргономические требования.
13. ГОСТ 22615—77. Система «человек—машина». Выключатели и переключатели типа «тумблер». Общие эргономические требования.
14. ГОСТ 22908—78. Система «человек—машина». Стрелочные и шкальные индикаторы. Общие эргономические требования.
15. ГОСТ 23144—78. Система «человек—машина». Трубки электронно-лучевые для отображения визуальной информации. Общие эргономические требования.
16. ГОСТ 23945.1—80. Унификация изделий. Основные положения.
17. **Гутин Л. Я.** Избранные труды//Теория пьезоэлектрических вибраторов, применяемых в гидроакустике.— Л.: Судостроение, 1970. С. 272—348.
18. **Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З.** Численные методы анализа.— М.: Наука, 1967.— 368 с.
19. **Добровольский Ю. Ю.** К определению параметров протяженных акустических антенн, состоящих из резонансных поршневых излучателей//Акуст. журн. АН СССР.— 1975.— Т. 21, вып. 4.— С. 538—543.
20. **Дружинин Г. В.** Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах.— М.: Энергия, 1976.— 448 с.
21. **Жуков В. Б.** Расчет гидроакустических антенн по диаграмме направленности.— Л.: Судостроение, 1977.— 184 с.

22. Карновский М. И. К расчету взаимных акустических импедансов//Сб. тр. Киевского ин-та киноинженеров.— 1948.— Т. 1.— С. 95—113.
23. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики.— М.: Сов. радио, 1975.— 470 с.
24. Комаров И. В., Пономарев Л. И., Славянов С. Ю. Сфероидальные и кулоновские сфероидальные функции.— М.: Наука, 1976.— 320 с.
25. Кудрявцев В. И. Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий промышленного рыболовства.— М.: Пищевая промышленность, 1972.— 359 с.
26. Кудрявцев В. И. Промысловая гидроакустика и рыболокция.— М.: Пищевая промышленность, 1978.— 311 с.
27. Логинов К. В., Шишло Ю. В. Применение гидроакустических поисковых приборов и сетевых зондов на промысле.— Мурманск: Мурманское книжн. изд-во, 1971.— 150 с.
28. Ломов Б. Ф. Человек и техника.— М.: Сов. радио, 1966.
29. Матвиенко В. Н., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств.— Л.: Судостроение, 1976.— 198 с.
30. Меньшиков В. И., Яковлев В. И. Выбор оптимальных параметров облавливающей системы по критерию скоростной выносливости рыб//Рыбное хозяйство, 1978, № 6.— С. 51—53.
31. Моисеева М. Э. Оценка совместимости требований к остойчивости, непотопляемости и бортовой качке судов.— Л.: Судостроение, 1976.— 72 с.
32. Морз Ф. Колебания и звук.— М.: Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1949.— 496 с.
33. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика.— Л.: Судостроение, 1981.— 264 с.
34. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации.— Л.: Судостроение, 1973.— 182 с.
35. Орлов Л. В., Шабров А. А. Расчет и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых станций.— М.: Пищевая промышленность, 1974.— 276 с.
36. Орлов Л. В. Особенности использования гидроакустической аппаратуры при поиске рыбы в придонном слое//Рыбное хозяйство, 1973, № 6, С. 38—40.
37. Орлов Л. В., Болгов В. М. Влияние помех на эффективность работы рыбопоисковой аппаратуры//Рыбное хозяйство, 1975, № 6.— С. 38—41.
38. ОСТ 5.8334—74. Надежность в судостроении. Аппаратура рыбопоисковая. Нормативные показатели надежности.
39. РД 50—33—80. Определение уровня унификации и стандартизации изделий.
40. Роберт Дж. Урик. Основы гидроакустики.— Л.: Судостроение, 1978.— 446 с.
41. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны.— Л., 1980.— 230 с.
42. Сканирующие антенны СВЧ/Пер. с англ. под ред. Г. Г. Маркова и А. Ф. Чаплина.— М.: Сов. радио, 1966.— Т. 1 и 2.— 536 с; 496 с.
43. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны.— Л.: Судостроение, 1984.— 302 с.
44. Справочник по гидроакустике//Колесников А. Е., Ляликов А. П., Евтютов А. П. и др. Л.: Судостроение, 1982.— 344 с.
45. Справочник по инженерной психологии//Под ред. Ломова Б. Ф.,— М.: Машиностроение, 1982.— 368 с.
46. Справочник по судовой акустике//Под ред. И. И. Клюкина.— Л.: Судостроение, 1978.— 503 с.
47. Справочник Подводные электроакустические преобразователи//Под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983.— 248 с.
48. Сташкевич А. П. Акустика моря.— Л.: Судостроение, 1966.— 353.
49. Физическая акустика/Под ред. У. Мезона. Методы и приборы ультразвуковых исследований. 1966.— Т. 1.— М.: Мир, — 592.
50. Хребтов А. А., Кошкарев В. Н., Осюхин Б. А. и др. Судовые измерители скорости. Справочник.— Л.: Судостроение, 1978.— 288 с.

51. Хребтов А. А., Виноградов К. А., Кошкарёв В. Н. и др. Судовые эхолоты.— Л.: Судостроение, 1982.— 232 с.
52. Шишонюк Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники.— М.: Сов. радио, 1964.— 551 с.
53. Юданов К. И. Расшифровка эхограмм гидроакустических рыбопоисковых приборов.— М.: Пищевая промышленность, 1967.— 116 с.
54. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции, графики, таблицы//Пер. с нем. под ред. Л. И. Седова.— М.: Наука, 1964.— 344 с.
55. Arase E. M. Mutual Radiation Impedance of Square and Rectangular Pistons in a Rigid Infinite Baffle//J. Acoust. soc. Amer.— 1964.— vol. 36, No 8,— 1521 p.
56. Donald T. Laird and Hirsh Cohen. Directionality patterns for acoustic radiation a source in a rigid cylinder//J. Acoust. Soc. Amer.— 1952.— Vol. 24, No 1.— P. 46—49.
57. Liebermann L. N. Sound. Propagation in chemically active media//Phys. Rev.— 1949.— Vol. 76.— 152 p.
58. Menges K. Uber Richtcharakteristiken von ebenen strahlerflächen, strahlerstracken mit ungleichmäßiger Amplitudes Vereilung und der Halbkresline//Akustische Zeitschrift,— 1941,— N. 2.— P. 90—108.
61. Sherman C. H. Analysis of Acoustic Interactions in Transducer Arrays — Transaction of Sonics and Ultrasonics//IEEE — 1966. 3V SU— 13,— N. 1, p. 9.
62. Sherman C. H. Mutual Radiation Impedance of Source on a Sphere//J. Acoust. Soc. Amer.— 1959.— Vol. 31, w. 7,— 947 p.
59. Pobey D. H. On the radiation impedance of on array of finite cylinders//J. Acoust. Soc. Amer.,— 1955.— Vol. 27,— pt. 4,— 706—710 p.
60. Pritchard R. L. Mutual Acoustic Impedance between Radiators in an Infinite Rigid Plane//J. Acoust. Soc. Amer.— 1960.— Vol. 32, N. 6.— 730 p.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ И ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ . . . . .</b>	<b>22</b>
§ 1.1. Организация проектирования . . . . .	22
§ 1.2. Исходные данные к расчету параметров гидроакустических станций . . . . .	26
1.2.1. Носитель гидроакустического изделия . . . . .	26
1.2.2. Объекты промысла . . . . .	31
1.2.3. Орудия лова . . . . .	38
1.2.4. Сила цели (СЦ) . . . . .	40
1.2.5. Зона действия . . . . .	43
1.2.6. Скорость звука. Коэффициент пространственного затухания . . . . .	50
1.2.7. Шумы и помехи . . . . .	51
1.2.8. Коэффициент распознавания . . . . .	59
1.2.9. Акустическая мощность . . . . .	61
<b>Глава 2. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ . . . . .</b>	<b>65</b>
§ 2.1. Характеристики основных параметров антенн . . . . .	65
§ 2.2. Плоские прямоугольные антенны (прямоугольные поршни) . . . . .	66
§ 2.3. Плоские антенны с естественным амплитудным распределением . . . . .	69
§ 2.4. Плоские антенны с круглой апертурой (круглые поршни) . . . . .	74
§ 2.5. Конические рефлекторные антенны. Антенны с кольцевой апертурой . . . . .	76
§ 2.6. Плоские антенны конечных размеров . . . . .	77
2.6.1. Конечный односторонний поршень с равномерным возбуждением круглой апертуры, экранированный с тыльной стороны жестким и мягким экранами . . . . .	83
2.6.2. Односторонний поршень, концентрический с конечным жестким экраном . . . . .	84
2.6.3. Односторонний поршень, концентрический с конечным мягким экраном . . . . .	85
2.6.4. Односторонний поршень, концентрический с конечным экраном различной толщины . . . . .	86
2.6.5. Односторонний вибратор с конечными экранами различной формы . . . . .	87
2.6.6. Односторонний поршень, концентрический с конечным локально-импедансным экраном . . . . .	88
2.6.7. Односторонний поршень, концентрический с переменным импедансным экраном . . . . .	90
2.6.8. Направленность точечного излучателя, расположенного вблизи плоского конечного экрана . . . . .	92
2.6.9. Структура бокового поля конечного одностороннего поршня с амплитудным распределением . . . . .	94

§ 2.7. Многоэлементные антенны . . . . .	99
2.7.1. Прямолинейные дискретные антенны . . . . .	99
2.7.2. Антенны из точечных элементов с амплитудным распределением . . . . .	101
2.7.3. Упрощенные выражения, определяющие ХН линейных антенн, в случае их симметрии относительно центра . . . . .	104
2.7.4. Антенны из точечных элементов с фазовым распределением . . . . .	104
2.7.5. Плоские антенны с компенсированными характеристиками направленности, состоящие из направленных элементов . . . . .	112
2.7.6. Цилиндрические антенны . . . . .	115
2.7.7. Антенны доплеровских лагов . . . . .	121
§ 2.8. Параметрические антенны . . . . .	127
§ 2.9. Коэффициент концентрации, излучаемая мощность и сопротивление излучения . . . . .	133
2.9.1. Мощность и коэффициент концентрации . . . . .	133
2.9.2. Сопротивление излучения . . . . .	138
<b>Глава 3. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ . . . . .</b>	<b>142</b>
§ 3.1. Пьезоактивные материалы и эквивалентные схемы . . . . .	142
§ 3.2. Выбор типа преобразователя . . . . .	152
§ 3.3. Расчет параметров преобразователей . . . . .	157
3.3.1. Условия механического резонанса . . . . .	158
3.3.2. Механическая добротность нагруженного преобразователя . . . . .	161
3.3.3. Прочность . . . . .	162
3.3.4. Мощность КПД . . . . .	163
3.3.5. Колебательная скорость излучающей поверхности (на частоте механического резонанса) . . . . .	163
3.3.6. Коэффициент электромеханической трансформации . . . . .	164
3.3.7. Сопротивление . . . . .	165
3.3.8. Давление, развиваемое преобразователем . . . . .	166
3.3.9. Электрическая емкость преобразователя . . . . .	166
3.3.10. Условия электромеханического резонанса (антирезонанса) . . . . .	166
3.3.11. Чувствительность . . . . .	167
§ 3.4. Пример расчета . . . . .	168
<b>Глава 4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ. ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ . . . . .</b>	<b>175</b>
§ 4.1. Показатели надежности . . . . .	175
§ 4.2. Экономические показатели . . . . .	178
§ 4.3. Инженерная психология . . . . .	184
§ 4.4. Показатели стандартизации и унификации . . . . .	190
<b>Глава 5. ПРОГРАММА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>192</b>
§ 5.1. Общие положения . . . . .	192
§ 5.2. Измерение и контроль параметров антенн и обтекателей при швартовых испытаниях и эксплуатации . . . . .	195
§ 5.3. Методы испытаний и измерений основных эксплуатационных характеристик поисковой аппаратуры . . . . .	197
<b>Глава 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ГИДРОЛОКАТОРА МАЛОТОННАЖНОГО СУДНА . . . . .</b>	<b>201</b>
§ 6.1. Техническое задание (ТЗ) . . . . .	201
§ 6.2. Анализ ТЗ. Обоснование принципиальной схемы гидролокатора и исходных данных для расчета . . . . .	203
§ 6.3. Расчет основных электроакустических параметров гидролокатора . . . . .	205
§ 6.4. Технические задания на проектирование приборов и систем . . . . .	210
§ 6.5. Расчет антенны . . . . .	211
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>217</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>218</b>



*Библиотека инженера-гидроакустика*

---

**Орлов Леонид Васильевич**  
**Шабров Анатолий Александрович**

**ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА**  
**РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА**

Заведующий редакцией *А. Д. Старков*  
Редактор *Э. В. Зубкова*  
Художественный редактор *О. П. Андреев*  
Технический редактор *Т. Н. Павлюк, Р. К. Чистякова*  
Корректоры *Т. С. Александрова, А. И. Оныщак*

**ИБ № 948**

Сдано в набор 04.12.86. Подписано в печать 12.06.87. М-32128. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14. Усл. кр.-отт. 14,0. Уч.-изд. л. 15,2. Изд. № 3934—84. Тираж 3460 экз. Заказ 3125. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

**В 1987 ГОДУ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ  
«СУДОСТРОЕНИЕ» В СЕРИИ «БИБЛИОТЕКА  
ИНЖЕНЕРА-ГИДРОАКУСТИКА» ВЫЙДЕТ  
В СВЕТ НОВАЯ КНИГА:**

**САМОЙЛОВ Л. К. Электронное управление характеристиками направленности антенн. 1987. 1 р. 30 к.**

Рассмотрены методы и средства цифровой техники и приборов гидроакустической связи. Главное внимание уделено цифровым методам управления направленностью антенных решеток при излучении и приеме акустических сигналов. Предлагаются возможные пути решения проблемы по созданию универсальной электронной части излучающей системы с цифровым управлением.

Для ИТР, занятых разработкой и эксплуатацией гидроакустических систем.



