

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.В. Митько, Н.Н. Попов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

МОРСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ



Санкт-Петербург
2013

*Одобрено методической комиссией океанологического
факультета РГГМУ*

УДК 322.24(073)

Митько А.В., Попов Н.Н. Лабораторный практикум по дисциплине «Морские информационные системы». — СПб.; РГГМУ, 2013. — 64 с.

В данном руководстве приведены основные методические рекомендации по подготовке и проведению практических занятий для студентов согласно учебной программы и тематическому плану по основным разделам дисциплины «Гидроакустические информационные системы».

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Морские информационные системы и оборудование».

Ответственный редактор: Митько В.Б., д-р техн. наук, проф. кафедры морских информационных систем РГГМУ.

Рецензент: Попов В.А., канд. техн. наук, ОАО «Концерн «Океанприбор».

© Митько А.В., Попов Н.Н., 2013

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2013

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия проводятся по дисциплине «Гидроакустические информационные системы» после прохождения соответствующих тем и разделов теоретического курса. По своему содержанию они могут иметь учебный или экспериментально-исследовательский характер и в зависимости от этого используются для проработки и закрепления теоретического материала учебной дисциплины и формирования у студентов умений в проведении испытаний или для привития студентам навыков в проведении самостоятельных исследований.

Лабораторное занятие должно включать отработку не более трех учебных вопросов (задач), продолжительность лабораторных занятий должна быть не более 6 учебных часов. Лабораторные занятия проводятся по учебным группам (подгруппам) численностью до 15 человек в коллективной или индивидуальной форме. Рекомендуется, чтобы на одном рабочем месте находилось не более четырех человек.

В задании на лабораторное занятие указываются тема, время и место проведения, вопросы (задачи), подлежащие исследованию, методические указания студентам по подготовке к занятию, перечень литературы и материалов для подготовки и проведения занятия, отчетные материалы по лабораторному занятию, сроки их представления и порядок защиты.

Задание и описание лабораторного занятия вручаются студентам с таким временным расчетом, чтобы они имели возможность качественно подготовиться к его проведению, но не позднее 5 суток до его начала.

Подготовка студентов к лабораторному занятию организуется и проводится в часы самоподготовки. Она включает изучение задания и знакомство с учебно-методическими материалами, рекомендованными заданием. В итоге их изучения студенты должны знать: теоретический материал, на основе которого проводится данное лабораторное занятие; цель, содержание и методику его проведения; правила использования приборов и лабораторного оборудования; меры безопасности. При подготовке к занятию студентам может быть поставлена задача заготовить необходимые исходные материалы (схемы, таблицы, графики). По всем неясным вопросам студенты могут обращаться за консультацией к преподавателю — руководителю данного занятия. Консультации могут проводиться как индивидуальные, так и коллективные.

Подготовка лабораторного оборудования осуществляется персоналом лаборатории по заявке преподавателя кафедры. Проверка готовности лабораторного оборудования к работе должна проводиться преподавателем накануне проведения занятия.

Обработка результатов эксперимента должна начинаться сразу же после приведения лабораторного оборудования в исходное состояние. По выполнении лабораторной работы студенты представляют отчет. Отчет состоит,

как правило, из трех частей. В первой части отчета указываются: наименование и цель выполнения работы; краткие теоретические положения, на основе которых проводилось данное занятие. Во второй части регистрируются опытные данные, полученные в ходе эксперимента, и результаты вычислений, на основе которых строятся графики, позволяющие провести анализ исследуемого явления. В третьей части отчета приводятся выводы по работе. К отчету по лабораторному занятию предъявляются следующие требования: краткость изложения; полнота и достоверность экспериментальных и расчетных данных, сведенных в таблицы или представленных в виде графиков; оценка точности полученных результатов; полнота анализов и выводов по работе.

Лабораторное занятие заканчивается подведением итогов и защитой отчетов. Защита также может проводиться в часы самостоятельной работы студентов.

При подведении итогов занятия преподаватель должен дать общую оценку по работе учебной группы, оценку работы каждого студента, отметить положительные стороны и недостатки, допущенные ими в ходе занятия, а также выдать задания на следующее занятие.

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Основные положения

Значение дальности действия гидроакустических приборов определяется величинами, зависящими от частоты. Так, например, от частоты зависят: уровень помех; полоса пропускания частот приемного тракта, обусловленная эффектом Доплера; коэффициент концентрации, влияющий как на уровень помех, так и на уровень сигнала; коэффициент затухания звука и т.д. Повышение частоты, с одной стороны, способствует увеличению дальности действия благодаря, например, снижению уровня помех; с другой стороны, приводит к увеличению затухания звука и тем самым влияет в сторону уменьшения дальности действия. Следовательно, существует частота оптимальная, при которой может быть достигнута заданная дальность действия гидроакустического прибора наименьшей ценой, т.е. наименьшей излучаемой мощностью в случае связи и эхолокации или наименьшей мощностью источника шумового сигнала в случае шумопеленгования.

Определение оптимальной частоты для различных типовых случаев основано на анализе частотно-зависимых параметров уравнения гидролокации. Поскольку дальность эхолокатора определяется уравнением:

$$J_{\text{э}} = \delta^2 J_{\text{п}} \text{ или } p_{\text{э}} = \delta \cdot p_{\text{п}}, \quad (1.1)$$

где $J_{\text{э}}$ — интенсивность эхосигнала; $J_{\text{п}}$ — интенсивность помех; или $p_{\text{э}}$ — давление эхосигнала; $p_{\text{п}}$ — давление помех; δ — коэффициент распознавания.

Для сферического объекта (или для сферического эквивалента):

$$J_{\text{э}} = \frac{P_{\text{а}} \cdot \gamma R_{\text{э}}^2 A^2}{16\pi r^4} \cdot 10^{-0,2\beta r}, \quad (1.2)$$

где A — фактор аномалии, в ряде случаев зависящий от частоты; в данном анализе можно считать, что A от частоты не зависит.

В большинстве практических приложений для частотной зависимости затухания с частотой в диапазоне 60 Гц — 60 кГц используют выражение:

$$\beta_{(\text{дБ/км})}(f) = 0,036 f_{(\text{кГц})}^{3/2}. \quad (1.3)$$

Для шумовой помехи при спаде спектральной плотности мощности 6 дБ/октава можно использовать выражение:

$$J_{\text{п}} = \frac{J_{0\text{п}} \Delta f_{(\Gamma_{\text{ц}})}}{f_{(\kappa \Gamma_{\text{ц}})}^2 \cdot \gamma}. \quad (1.4)$$

Коэффициент распознавания в случае гидролокации, как будет показано далее, определяется как:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\Delta f T_c}} K_{\delta}, \quad (1.5)$$

где Δf — полоса пропускания приемного тракта; T_c — длительность сигнала; K_{δ} — пороговое отношение сигнал/помеха на индикаторе.

В свою очередь, полосу пропускания приемного тракта, обусловленную эффектом Доплера, можно представить в виде:

$$\Delta f = 4f \frac{V_{\text{max}}}{c}, \quad (1.6)$$

где V_{max} — максимальная скорость цели, c — скорость звука в морской воде.

Таким образом, в случае гидролокации зависящими от частоты величинами являются γ , $J_{\text{п}}$, β , Δf (если считать, что сила цели от частоты не зависит, в случае необходимости учесть эту зависимость нетрудно). Если при проектировании гидролокатора задается постоянная площадь (размеры) приемной и передающей систем то, например, для плоской прямоугольной антенны коэффициент концентрации описывается формулой:

$$\gamma = \frac{4\pi S}{\lambda^2} = \frac{4\pi S f^2}{c^2}. \quad (1.7)$$

Если площадь излучающей и приёмной антенны остаётся постоянной, то это означает, что с изменением частоты не удерживается постоянной величина L/λ , определяющая растров характеристики направленности (где L — размер приёмно-излучающей системы). После подстановки в исходную формулу всех перечисленных частотно-зависимых параметров, можно привести её к виду $Y(f) = B$ и в соответствии с поставленной задачей отыскания оптимальной частоты исследовать функцию $Y(f)$ на максимум и минимум, выполнив операцию:

$$\frac{\partial Y(f)}{\partial f} = 0. \quad (1.8)$$

При проектировании гидролокатора задается постоянная площадь приемной и передающей системы. Это означает, что с изменением частоты не удерживается постоянной величина L/λ , определяющая ширину характеристики направленности, где L — размер приемно-излучающей системы.

Теперь подставим в формулу (1.1) величины, входящие в нее и представленные формулами (1.2-1.7). После подстановки получим:

$$\frac{P_a R_3^2 A^2 4\pi S f^2 \cdot 10^{-0,2-0,036 f^{3/2} r}}{16\pi r^4 \cdot c^2} = \frac{2K_\delta^2 a_\Pi c^2 \left(\frac{v}{v_0}\right)^6}{T 4\pi S f^2 f^2}, \quad (1.9)$$

где a_Π – в ВГГц/см²; в экспоненте f – в кГц, r – в км.

Обозначив произведение не зависящих от частоты величин через B , получим:

$$Y(f) = f^6 10^{18} \cdot 10^{-0,0072 f^{3/2} r} = B, \quad (1.10)$$

где f – в кГц, r – в км.

$$B = \frac{2a_\Pi K_\delta^2 c^4 r^4 \left(\frac{v}{v_0}\right)^6}{\pi S^2 P_a R_3^2 A^2 T} \quad (1.11)$$

или

$$P_a = \frac{2a_\Pi K_\delta^2 c^4 r^4 \left(\frac{v}{v_0}\right)^6}{B \pi S^2 R_3^2 A^2 T} \text{ Вт.} \quad (1.12)$$

В соответствии с поставленной задачей отыскания оптимальной частоты, исследуем функцию $Y(f)$, представленную выражением (1.10), на мак-

симум и минимум. Для этого выполним операцию $\frac{\partial Y(f)}{\partial f} = 0$. Обращаясь к (1.10), будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y(f)}{\partial f} &= \frac{\partial}{\partial f} \left[f^6 10^{-0,0072 f^{3/2} r} \right] = 6f^5 10^{-0,0072 f^{3/2} r} - f^6 10^{-0,0072 f^{3/2} r} \frac{3 \cdot 0,0072 f^{3/2} r}{2} 2,3 = \\ &= 6 - 24,8 \cdot 10^{-3} r f^{3/2} = 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$f_{opt} = \left(\frac{242}{r} \right)^{2/3} \quad \text{или} \quad f_{opt(\text{кГц})} = \frac{39}{r_{(\text{км})}^{2/3}}, \quad (1.13)$$

где f – в кГц, r – в км.

Таким образом найдена частота, при которой функция $Y(f)$ имеет максимум. Легко убедиться, что максимуму функции $Y(f)$ соответствует минимум излучаемой мощности при прочих заданных величинах, т.е., например, при $r = \text{const}$, $S = \text{const}$, $R_3 = \text{const}$. Этот результат можно интерпретировать и так, что оптимальная частота соответствует достижению максимума дальности действия γ при прочих заданных величинах, входящих в приведённые формулы.

Сказанное иллюстрируется на рис. 1.1 графиками, рассчитанными по приведённым формулам. Из них видно, что чем больше заданная дальность действия, тем ниже оптимальная частота. Графики показывают, что при отклонении от оптимальной частоты для достижения заданной дальности требуется большая мощность, чем мощность, затрачиваемая для достижения той же дальности при оптимальной частоте.

Например, для достижения дальности действия гидролокатора 2 км на оптимальной частоте $f_{\text{опт}} = 25$ кГц потребовалась бы в некоторых условиях акустическая мощность 60 Вт, а если рабочая частота будет ниже оптимальной, например на 15 кГц, то для обеспечения той же дальности надо увеличить мощность приблизительно в три раза. Проведенный анализ оптимальной частоты дает представление о подходе к обоснованию рабочей частоты. В каждом конкретном случае вместо формулы (1.13) может быть получена формула с другими коэффициентами.

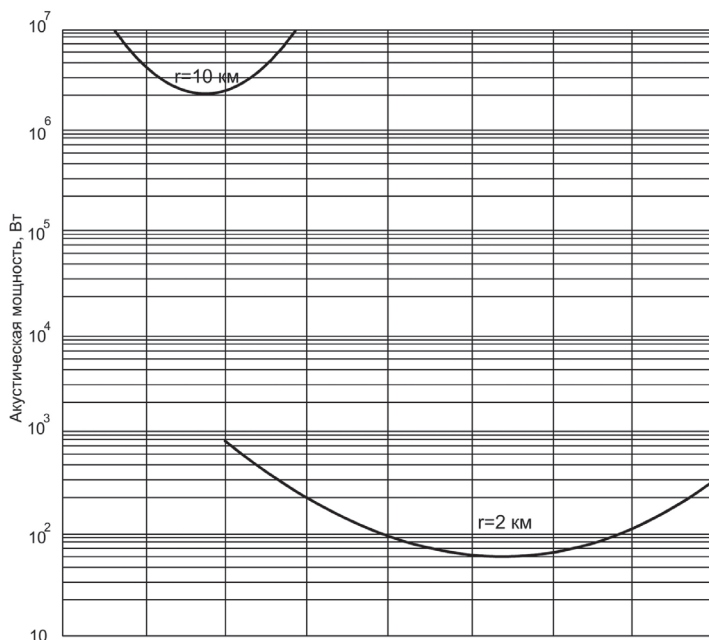


Рис. 1.1. Иллюстрация оптимальной частоты для случая гидролокации.

1.2. Описание экспериментальной установки

Используя программу «Дальность действия», изучить правило расчёта дальности действия и параметров ГЛС в соответствии с прилагаемым текстом инструкции пользователю программы расчёта дальности действия.

Инструкция пользователю программы «Расчет дальности действия ГАС»

Данная программа представляет собой универсальный калькулятор для расчета энергетической дальности действия различных гидролокационных станций в четырех режимах работы: гидролокация, шумопеленгование, ОГС (обнаружение гидроакустических сигналов), режим связи. Также, при необходимости, можно рассчитать коэффициент помехоустойчивости для трех типов приемных антенн и излучаемое давление на оси по заданной мощности и размерах антенны для всех режимов работы станции. Кроме того, программа позволяет создавать базы данных по различным станциям с последующим их использованием для расчетов.

Для выполнения расчетов с использованием программного обеспечения необходимо:

1. Установить программу (если это не было сделано раньше), для чего необходимо переписать папку «Расчет дальности действия ГАС» на жесткий диск компьютера.
2. Находясь в среде Windows, запустить файл «W44.EXE». На дисплее появится форма, которая содержит (см. рис. 1.2):
 - i. Верхнюю горизонтальную полосу главного меню, состоящую из следующих разделов: Файл; Коэффициент помехоустойчивости; Порог; Расчет Р1; Учет ГАУ; Справка;
 - ii. Окно с графиком расчета дальности;
 - iii. Окно с таблицей данных станции для текущего режима работы;
 - iv. Окно с названием станции;
 - v. Панель с режимами работы ГАС;
 - vi. Панель с параметрами сигнала;
 - vii. Панель для ввода или расчета коэффициента затухания;
 - viii. Кнопку «Расчет».
3. При запуске программы данные для расчета автоматически загружаются из инициализирующего файла «Sona.ini». При необходимости его содержимое можно изменить.
4. Сведения об энергетической дальности содержатся в верхней части окна с графиком. Также об энергетической дальности можно судить по графику. При необходимости, можно изменить (уменьшить/увеличить) масштаб путем выделения интересующей области с помощью мыши с нажатой правой клавишей. График отображает зависимость уровня сигнала (красная линия), выраженного в дБ, от расстояния – в км. Уровень порога проведен синей линией.
5. Редактирование данных в таблице осуществляется путем щелчка левой кнопкой мыши по требуемой ячейке, а затем записи в нее желаемой величины. По окончании редактирования расчет дальности производится путем нажатия кнопки «Расчет» или двойным щелчком мышки в любом месте формы.

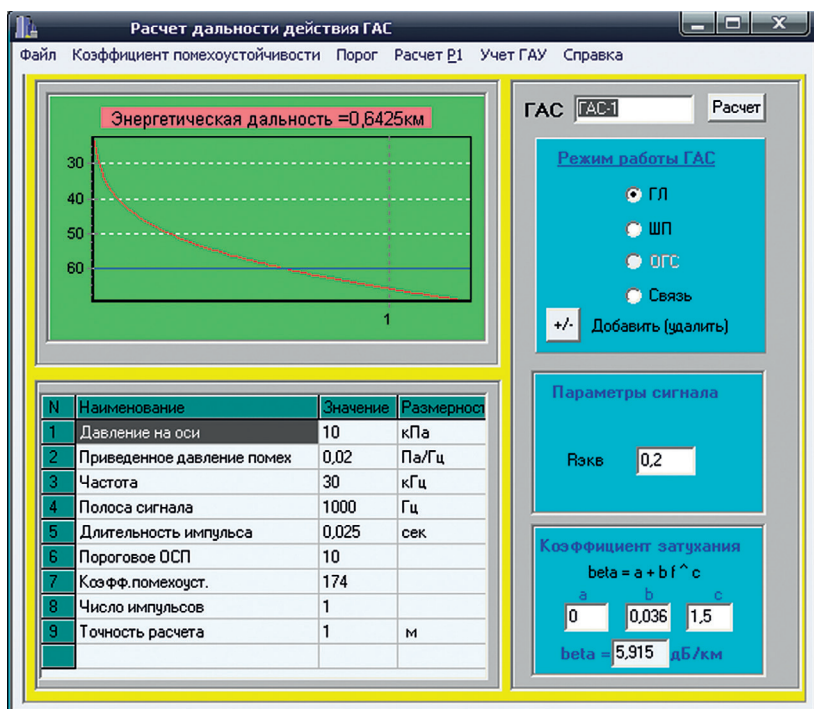


Рис. 1.2. Окно программы расчёта дальности действия ГАС.

- Содержание таблицы соответствует режиму работы станции. Режимы, в которых может работать данная станция, подсвечены на панели «Режим работы ГАС». Добавление или удаление режима осуществляется путем нажатия кнопки «+/-» на этой же панели. Напротив режимов работы появятся окошки активизации, при нажатии на которые можно включить/выключить соответствующий режим.
- Расчет коэффициента затухания осуществляется на панели «Коэффициент затухания» при помощи задания величин, входящих в формулу расчета. Также можно задавать коэффициент затухания непосредственно вводом в окошко « $\beta = \dots$ дБ/км».
- Создание базы данных по режимам для одной или нескольких станций осуществляется путем записи названия станции в окошко «ГАС», активизации необходимых режимов работы, корректировки таблиц с данными станции и параметров сигнала и сохранения данных в файл.
- При необходимости, можно произвести расчет значения коэффициента помехоустойчивости для текущего режима по известным размерам приемной антенны. Для этого надо нажатием левой кнопки мыши перейти в раздел «Коэффициент помехоустойчивости» главного меню и выбрать

тип антенны, при нажатии на который выпадает диалоговое окно, содержащее поля ввода размеров антенны, поле отображения вычисленного коэффициента помехоустойчивости и три кнопки:

- i. «Расчет», при нажатии на которую производится расчет коэффициента;
- ii. «Ввод в табл.», при нажатии на которую происходит запись рассчитанного коэффициента в таблицу с данными станции и закрытие диалогового окна;
- iii. «Закрыть», при нажатии на которую также происходит закрытие данного диалогового окна.

10. Программа также позволяет рассчитать значение излучаемого давления на оси на 1 м для текущего режима и при необходимости записать это значение в соответствующую ячейку в форме. Для этого надо нажатием левой кнопки мыши перейти в раздел «Расчет Р1» главного меню, при этом выпадает диалоговое окно, содержащее поля ввода размеров антенны, мощности излучения (удельной или акустической), поля отображения вычисленного значения давления и коэффициента концентрации антенны, панель для выбора типа излучающей антенны и три кнопки:

- i. «Расчет», при нажатии на которую производится расчет давления;
- ii. «Ввод», при нажатии на которую происходит запись рассчитанного значения в таблицу с данными станции или соответствующее окно в форме;
- iii. «Закрыть», при нажатии на которую также происходит закрытие данного диалогового окна.

Расчет производится выбором типа излучающей антенны, при этом окна ввода параметров, необходимых для расчета, будут автоматически подсвечены.

1.3. Порядок выполнения работы

- 1. Вычислить значения расстояний, соответствующих оптимальным частотам 5 кГц; 10 кГц; 20 кГц.
- 2. Используя программу «Расчет дальности действия ГАС» определить зависимости дальности действия от частоты для 10 контрольных точек через 1кГц влево и вправо от выбранных частот и сделать выводы о наличии максимума дальности действия на оптимальной частоте.
- 3. Результаты измерений и вычислений свести в таблицу.
- 4. На основе анализа результатов работы сделать вывод о характере зависимости дальности действия от частоты и наличии значения частоты, на которой обеспечивается максимальная дальность при неизменных параметрах гидролокационной системы.

1.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Результаты расчетов.
5. Краткие выводы.

1.5. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА (ППЗК)

2.1. Основные положения

Скорость звука является одним из важнейших акустических параметров водной среды. Значение скорости звука можно вычислить по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}},$$

где χ – коэффициент объемной упругости; ρ – плотность.

Напомним, что для воды при температуре 10°C и солёности $S = 15 \text{ ‰}$ (15 промилле) модуль объемной упругости $\chi = 2,16 \times 10^{10} \text{ дин/см}^2$.

В морских условиях под влиянием изменения температуры, солёности и статического давления модуль объемной упругости и плотность воды претерпевают существенные изменения, вследствие чего скорость звука может принимать значения приблизительно в пределах от 1440 до 1540 м/с. Зависимость скорости звука от температуры, солёности и статического давления была установлена экспериментальным путем. Можно привести некоторые экспериментальные формулы, дающие наиболее точный результат:

– Формула Вуда:

$$c = 1450 + 4,206t - 0,0366t^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175h, \quad (2.1)$$

где c – скорость звука, м/с; t – температура, $^\circ\text{C}$; S – солёность, ‰ ; h – глубина, м.

Ошибка расчета по этой формуле минимальна при температурах, близких к 10°C , и различных значениях солёности. При этих условиях разность между измеренным и расчетным значениями скорости звука не превышает 1,5 м/с. Наибольшая погрешность (6 м/с) наблюдается для пресной воды при температуре 30°C .

– Формула Дель-Гроссо:

$$c = 1448,6 + 4,618t - 0,0523t^2 + 0,00023t^3 + 1,25(S - 35) - 0,011(S - 35)t + \\ + 0,0027 \cdot 10^{-5} (S - 35)t^4 - 2 \cdot 10^{-7} (S - 35)^4 \cdot (l + 0,577t - 0,0072t^2). \quad (2.2)$$

Обозначения здесь те же, что и выше. Формула справедлива для скорости звука у поверхности моря. Чтобы учесть влияние статического давления, возрастающего с глубиной линейно, необходимо к формуле приписать

слагаемое, учитывающее изменение скорости звука с глубиной. В частности, согласно Вуду, это слагаемое равно $0,0175h$ (h – глубина, м).

Формулы показывают, что с увеличением температуры, солёности и статического давления скорость звука возрастает, причем с увеличением солёности и статического давления – линейно. Так, например, приращению температуры на 1°C при температуре 20°C соответствует приращение скорости звука, равное $2,7 \text{ м/с}$, тогда как приращение солёности на 1 ‰ и статического давления на 1 атм вызывает увеличение скорости звука на $1,14$ и $0,175 \text{ м/с}$ соответственно. При количественной оценке изменения скорости звука пользуются понятием градиента. Обозначая через G_c градиент скорости звука, будем иметь:

$$G_c = \frac{dc(t, S, h)}{dh}, \quad (2.3)$$

где $c(t, S, h)$ – функциональная зависимость скорости звука от температуры, солёности и глубины. Воспользовавшись первой зависимостью для градиента в данной точке, получим:

$$G = dc / dh = (4,21 - 0,073t) dt / dh + 1,14 dS / dh + 0,0175.$$

Обозначая $dt/dh = G_t$; $dS/dh = G_s$, где G_t и G_s – градиенты температуры и солёности соответственно получаем:

$$G_c = (4,21 - 0,073t) G_t + 1,14 G_s + 0,0175. \quad (2.4)$$

Здесь $|G_c|$ 1/сек; G_t град/м; $|G_s|$ ‰/м.

Последнее слагаемое в этом выражении отражает влияние статического давления. Изменение скорости звука действием каждого из факторов в отдельности учитывается соотношениями:

$$G_c(t) = (4,21 - 0,073t) G_t, \quad G_c(S) = 1,14 G_s, \quad G_c(P_o) = 0,175 G_p,$$

где G_p – градиент статического давления, $G_p = 0,1 \text{ атм/м}$.

Распределение скорости звука как по глубине, так и в горизонтальном направлении является следствием совокупного изменения температуры, солёности и статического давления. Характер распределения скорости звука в основном определяется распределением температуры, но нередки случаи, когда ход изменения скорости звука существенно зависит от распределения солёности и статического давления. Это имеет место в глубоких водоемах и в водоемах с резко меняющейся солёностью. Вертикальное распределение скорости звука в общих чертах следует сезонным изменениям температуры и солёности. Однако сезонные изменения часто

нарушаются. Таким образом, на закономерные временные изменения вертикального распределения звука накладываются изменения случайного характера. Тем не менее, можно указать типичные случаи вертикального распределения скорости звука, использующиеся в документах по применению ГАС НК (гидроакустических систем надводного корабля), которые будут приведены ниже.

Методы оценки поля в морской среде основаны на применяемых моделях акустических полей. Строгое решение задачи распространения акустических волн в ограниченных средах возможно с использованием методов волновой акустики. Основой волновых методов является решение волнового уравнения для заданных начальных и граничных условий. Для безграничной однородной среды решение волнового уравнения затруднений не вызывает. В реальной среде скорость звука является функцией пространственных координат (x, y, z) . В первом приближении изменением скорости звука в функции координат x и y можно пренебречь. Такая модель соответствует так называемой слоисто—неоднородной среде, в которой скорость звука является только функцией глубины. Решение волнового уравнения с использованием метода Фурье при излучении гармонических волн с учетом цилиндрической симметрии задачи для среды с границами приводит к следующему результату:

$$p(r, z) = \sum z_i(z) H_0^{(1)}(\alpha_i r) + \psi(r, z_0), \quad (2.5)$$

где z_0 и z — координаты источника и приемника соответственно; r — горизонтальное расстояние; α_i — горизонтальные волновые числа; $H_0^{(1)}$ — функция Ганкеля первого рода нулевого порядка; Ψ — представляет вклад, даваемый неоднородными (экспоненциально затухающими с расстоянием) волнами и боковой волной.

Сумма в правой части (2.5) описывает совокупность нормальных волн, которые являются стоячими в направлении оси z и бегущими с фазовой скоростью $v = \omega/\alpha$ в направлении оси r . Такие волны называют нормальными волнами или модами, поскольку они соответствуют движениям, при которых вся среда колеблется с одной частотой ω . Амплитуды нормальных волн на больших расстояниях убывают обратно пропорционально расстоянию (цилиндрический закон спада). Боковые волны распространяются вдоль границы среды со скоростью, равной скорости распространения волн в этих средах. Амплитуды боковых волн убывают с расстоянием по закону $1/r^2$. Нормальные волны определяют величину акустической энергии, захваченной волноводом и имеют доминирующее значение на больших расстояниях от источника. При отсутствии волноводных эффектов, а также на небольших расстояниях в формировании поля играют важную роль боковые волны.

Таким образом, акустическое поле, являясь суперпозицией определенного числа нормальных волн, имеет сложную интерференционную структуру. Хотя определение амплитуды и фазы каждой нормальной волны не представляет принципиальной трудности, их суммирование может оказаться весьма сложной задачей. Количество нормальных волн определяется соотношением толщины слоя к длине волны H/λ . На больших расстояниях число нормальных волн может быть весьма велико, что создает трудности при вычислении.

Расчет поля с использованием волнового уравнения правомерен в достаточно широком диапазоне частот, начиная от 1 Гц до десятков кГц. Однако в большинстве случаев решение волнового уравнения заканчивается интегральным представлением. Доведение решения до суммы нормальных волн оказывается возможным только для весьма ограниченного числа сравнительно простых профилей $c(z)$, не охватывающих всего многообразия встречающихся в практике распределений. Как интегральное представление, так и решение в виде суммы нормальных волн не позволяют довести задачу о поле точечного источника до результатов, поддающихся анализу и наглядной физической интерпретации.

Отмеченные трудности математического и вычислительного плана, отсутствие возможности физической интерпретации результатов привели к разработке приближенных методов расчета полей в океанической среде, к числу которых в первую очередь следует отнести методы, основанные на *лучевой (геометрической) теории*. Лучевая теория является асимптотическим решением волновой теории и дает удовлетворительные результаты только при $f \rightarrow \infty$, т.е. в области высоких частот.

Основными достоинствами лучевой теории является ее сравнительная простота, наглядность, возможность оценки поля практически для любых профилей скорости звука, неизменных в пространстве. Широкое развитие компьютерных технологий увеличило сферу применения лучевой теории. Можно сказать, что лучевой анализ в прикладной гидроакустике в настоящее время преобладает над волновой теорией. В то же время лучевая теория имеет целый ряд существенных недостатков. Она не дает правильного результата на каустиках, в фокальных точках, в зоне тени, при расположении источника и приемника звука вблизи дна. Лучевая теория не учитывает частотную зависимость параметров поля (фактора фокусировки), что противоречит физике явления.

Основой лучевой (геометрической теории) акустического поля является представление об акустических лучах, перпендикулярных волновой поверхности в каждый момент времени, вдоль которых осуществляется перенос акустической энергии.

Два луча, выходящие из источника звука с углами скольжения α_0 и $\alpha_0 + d\alpha_0$ образуют энергетическую трубку (рис. 2.1).

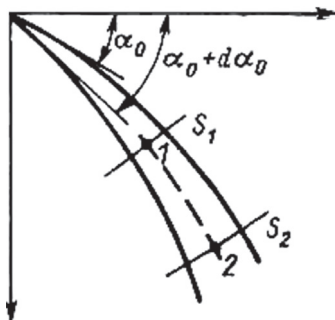


Рис. 2.1. Энергетическая трубка.

В соответствии с законом сохранения энергии, амплитуда давления в некоторой точке может быть определена из следующего очевидного соотношения:

$$p_2 = p_1 \sqrt{\rho_1 c_2 S_2 / \rho_2 c_1 S_1}, \quad (2.6)$$

где S_1, S_2 — площади поперечного сечения энергетической трубки в точках 1 и 2; ρ_1, ρ_2 — давления в точках 1 и 2; ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 — параметры среды.

Нетрудно видеть, что подобным способом амплитуду волны на любом расстоянии в пределах энергетической трубки можно связать с начальной амплитудой точечного источника. Исключением являются фокальные точки 1, 2 и окрестности каустика, где $S_2 = 0$. Лучевая теория позволяет вычислить и фазу импульса, распространяющегося вдоль луча. Применительно к рис. 2.1 для набега фазы вдоль луча от точки 1 до точки 2 будет справедливо $\varphi = \omega \tau$, где τ — время пробега импульса вдоль луча.

Таким образом, для расчета поля необходимо определение площади поперечного сечения элементарных энергетических трубок, что в свою очередь, требует расчета траекторий акустических лучей при заданном распределении скорости звука в функции пространственных координат. В слоисто-неоднородной среде касательная к траектории луча должна удовлетворять закону Снеллиуса:

$$c(z_0) / \cos \alpha_0 = c(z_1) / \cos \alpha_1 = c(z_2) / \cos \alpha_2 = \dots = c(z_i) / \cos \alpha_i = c_T(z). \quad (2.7)$$

Величина c_T является скоростью звука на горизонте, где луч горизонтален ($\alpha = 0$. Луч претерпевает полное внутреннее отражение). Выражение (2.7) показывает, что угол скольжения на некотором горизонте z_i — определяется углом α_0 на горизонте z_0 , отношением скоростей $c(z_i)/c(z_0)$ и не зависит от значений скорости звука в промежуточных слоях:

$$c(z_0) / \cos \alpha_0 = c_T(z).$$

Траектория акустического луча. Пусть скорость звука является линейно—убывающей функцией глубины (рис. 2.2):

$$c(z) = c_0 [1 - a(z - z_0)],$$

где c_0 — скорость звука на глубине излучателя z_0 ; $a = \frac{1}{c_0} \left| \frac{dc}{dz} \right|$ — относительный градиент скорости звука.

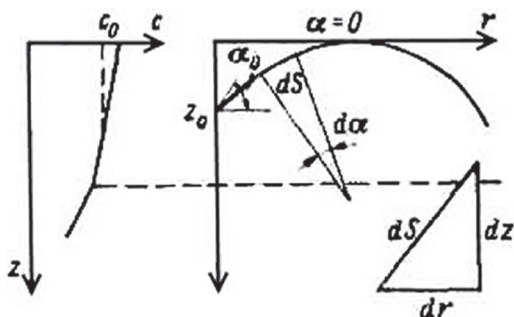


Рис. 2.2. Траектория акустического луча при постоянном градиенте скорости звука.

В соответствии с законом Снеллиуса луч будет рефрагировать вниз. Из бесконечно малого элемента луча имеем $dr = |dz / \operatorname{tg} \alpha|$.

Полное горизонтальное расстояние, проходимое лучом, равно:

$$r = \left| \int_{z_0}^z \operatorname{ctg} \alpha dz \right|. \quad (2.8)$$

После вычислений получаем:

$$(r - \operatorname{tg} \alpha_0 / a)^2 + [1/a - (z - z_0)]^2 = 1/a^2 \cos^2 \alpha_0. \quad (2.9)$$

Из (2.9) видно, что при $a = \operatorname{const}$ траекторией луча является дуга окружности радиуса $\rho = 1/a \cos \alpha_0$ с координатами центра в точке $R_{\text{ц}} = \operatorname{tg} \alpha_0 / a$; $z_{\text{ц}} = z_0 + 1/a$.

В случае произвольного профиля скорости звука траектория луча может быть представлена как сопряжение дуг окружностей различных радиусов. Зависимость $c(z)$ при этом аппроксимируется линейными отрезками.

Фактор фокусировки. В рамках лучевой теории интенсивность звука, развиваемая некоторым источником, определяется законом расширения лучевой трубки, если допустить, что энергия не выходит за ее границы (рис. 2.3).

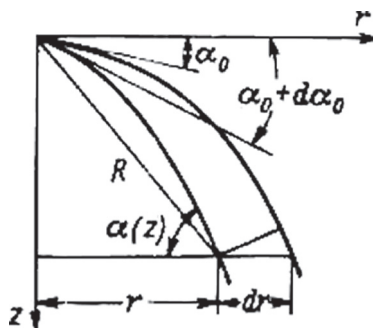


Рис. 2.3. К определению фактора фокусировки.

Определение фактора фокусировки как отношения силы звука в реальной среде к силе звука в однородной среде применительно к большим расстояниям имеет вид:

$$f(\alpha, r) = \frac{r \cos \alpha_0}{|\partial r / \partial \alpha_0| \sin \alpha(z)}. \quad (2.10)$$

Таким образом, акустическое поле источника будет определено, если известна аналитическая зависимость для горизонтального расстояния r и существует производная от него по углу выхода луча из источника. Фактор фокусировки может быть больше и меньше единицы. Лучевая теория достаточно точно определяет траекторию звуковых лучей, если на длине акустической волны скорость звука может считаться неизменной. Количественно это выражается неравенством $a\lambda \ll 1$, где a — относительный градиент скорости звука.

Л.М. Бреховских для случая положительной рефракции получил еще одно условие применимости лучевой теории, ограничивающее значение угла скольжения на заданном горизонте в зависимости от градиента скорости звука и частоты:

$$\alpha_0 \geq (a\lambda / 2\pi)^{1/3}. \quad (2.11)$$

Эти выражения являются условиями применимости лучевой теории. Фактор фокусировки обращается в бесконечность в точках заворота луча ($a(r) = 0$) и в области каустик, где $\partial r / \partial \alpha_0 = 0$.

2.2. Приповерхностный звуковой канал (ППЗК)

Толщина слоя с положительными градиентами определяется сезоном года и широтой места. Зимой в высоких широтах положительные градиенты простираются от поверхности до дна с максимальным значением до

$a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. В умеренных и низких широтах величины градиентов меньше, а толщины слоев не превосходят десятков, редко сотни метров. В частности, средние глубины слоя в Северной Атлантике (40...50° с.ш.) составляют: 60 м (январь-март), 27 м (апрель-июнь); 21 м (июнь-сентябрь); 45 м (октябрь-декабрь).

Для существования ППЗК отрицательный градиент не должен превышать установленного значения, определяемого влиянием гидростатического давления на значение скорости звука. В изотермическом слое гидростатическое давление формирует градиент скорости звука $0,017 \text{ с}^{-1}$. При $T = 15^\circ \text{ С}$, которая создает этот градиент скорости звука. Перепад скорости звука должен быть на 1° С на 180 м. Если отрицательный градиент скорости меньше, чем этот, то образуется канал (рис. 2.4).

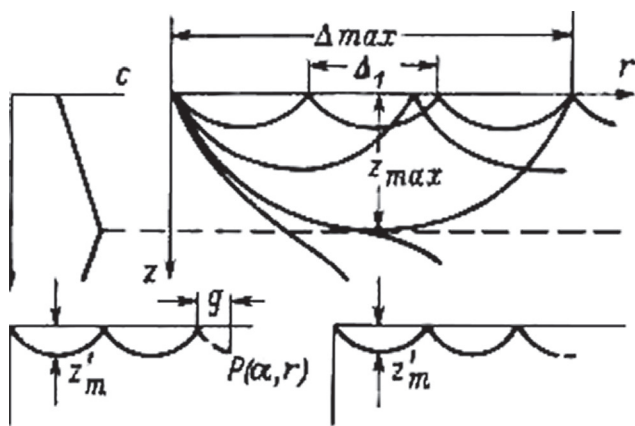


Рис. 2.4. Лучевая картина в условиях ППЗК.

Характерной особенностью ППЗК является многолучевость распространения и канализация энергии. Примем верхнюю границу плоской с коэффициентом отражения $|V| = 1,0$. Это эквивалентно условию, что высоты неровностей поверхности малы по сравнению с длиной волны. Этому условию удовлетворяют акустические волны с частотами не выше сотен герц, а при благоприятных условиях до 5...6 кГц. Сигнал в точке приема является суперпозицией сигналов, распространяющихся по разным лучам с различными временами запаздывания. При импульсном излучении и коротких посылках приходящие сигналы вначале разделяются во времени, а затем начинают перекрываться и суммироваться.

Учитывая многолучевой характер формирования акустического поля в условиях ППЗК, потери каждым лучом части энергии при отражении от поверхности и направленность излучателя для интенсивности поля на любом расстоянии, можно написать:

$$I(r) = \left[P_a \gamma_1 10^{-0,1\beta r} / 4\pi r^2 \right] \sum_{i=1}^N f_i(\alpha) R_i^2(\alpha, \varphi) W^{2n}(\alpha), \quad (2.12)$$

где N – число лучей, приходящих в точку наблюдения r ; W, n – коэффициент и число отражений лучей от поверхности моря; R_i – значение диаграммы направленности на i -м луче.

Заметим, что аналогичным образом может быть найдено выражение для интенсивности поля в условиях многолучевого распространения при произвольном распределении скорости звука. В выражение (2.12) при этом следует дополнительно ввести коэффициент отражения от дна моря $V(a)$ и число отражений m . Сумма в выражении (2.12) называется **фактором аномалии** (аномалией распространения):

$$A_f = \sum_{i=1}^N f_i(\alpha) R_i^2(\alpha, \varphi) W^{2n}(\alpha). \quad (2.13)$$

2.3. Антиволноводное распространение звука

Антиволноводному распространению соответствует уменьшение скорости звука с глубиной, обусловленное понижением температуры. На глубинах в больших слоях скачка величины градиентов постепенно уменьшаются вплоть до дна или оси ПЗК. Для лучевой картины при размещении источника на глубине z_0 характерно наличие верхнего предельного луча α_{om} , разделяющего ближнюю зону освещенности от зоны тени. Лучи с углами $\alpha > \alpha_{om}$ отражаются от поверхности моря. Протяженность ближней зоны акустической освещенности (БЗАО) определяется величиной градиента a и ординатами источника звука z_0 и точки наблюдения z . Величина радиуса БЗАО определяет геометрическую дальность действия ГАС и легко может быть определена из рис. 2.5:

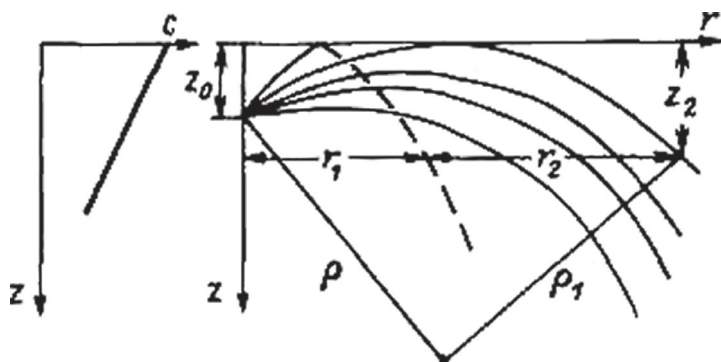


Рис. 2.5. Лучевая картина в условиях отрицательной рефракции.

$$D_{\text{гл}} = r_1 + r_2 \approx \sqrt{2\rho z_0} + \sqrt{2\rho z} = \sqrt{2/a} (\sqrt{z_0} + \sqrt{z}), \quad (2.14)$$

где $\rho = 1/\alpha \cdot \cos \alpha_0$.

Следует отметить, что понятие резкой границы между освещенной зоной и зоной тени является весьма условным. В зоне тени существует слабое акустическое поле, сформированное рассеянием волн на неоднородностях среды и отражением от дна моря. Кроме того, всегда присутствуют дифракционные явления и волны, рассеянные неровной поверхностью моря. Интенсивное перемешивание воды в верхнем слое может свести градиент к нулю. Образуется однородный слой некоторой толщины h , лежащий на слое с отрицательными градиентами. При размещении излучателя в пределах однородного слоя интенсивность поля в нем спадает по сферическому закону $I \approx 1/r^2$ до некоторого условного расстояния r_0 , начиная с которого сказывается действие неоднородной среды, вызывающей отбор части энергии. С позиции лучевой акустики это объясняется распылением лучей, поэтому на больших удалениях сила звука оказывается весьма малой. С точки зрения волновой теории поле источника в пределах этого слоя представляет сумму нормальных волн.

На малых расстояниях в формировании поля принимает участие большое число нормальных волн, мало разнящихся по амплитуде. В этом случае оценка поля по лучевой теории совпадает с волновой. На больших расстояниях поле определяется несколькими наименее затухающими волнами. Амплитуды волн при этом значительно меньше амплитуд волн, развиваемых источником в безграничной среде, в связи с чем эту зону пониженной интенсивности можно назвать зоной «эффективной» тени.

2.4. Типичное вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ)

Типичное ВРСЗ для глубокого моря имеет вид, представленный на рис. 2.6.

В нём можно выделить несколько участков, имеющих различные характеристики и протяженность:

1. Непосредственно у поверхности моря расположен слой воды, в которой скорость звука подвержена суточный и локальным воздействиям теплоты, холода и ветра. У поверхности может также находиться перемешанный слой с постоянным значением температуры по глубине, который образуется в результате перемешивания воды ветром, дующим над поверхностью моря. В перемешанном слое создаются условия для формирования звукового канала и *дальних зон акустической освещённости*. Дальняя зона акустической освещённости (ДЗАО) — это пространственная область в толще воды возникающая на значительном расстоянии от источника звука за счет выхода звуковых лучей на горизонт источника после полного внутреннего, отражения в глубинных слоях ниже оси

подводного звукового канала. Существуют первая, вторая и т.д. ДЗАО, образующиеся в результате многократного отражения звуковых лучей от поверхности водной среды и их полного внутреннего отражения в глубинных слоях ниже оси подводного звукового канала. ДЗАО образуются при условии размещения источника акустических волн выше оси подводного звукового канала и отрицательном градиенте скорости звука по глубине в точке нахождения источника. При длительном безветрии и солнечной погоде перемешанный слой исчезает и приповерхностная масса воды приобретает уменьшающуюся с глубиной температуру.

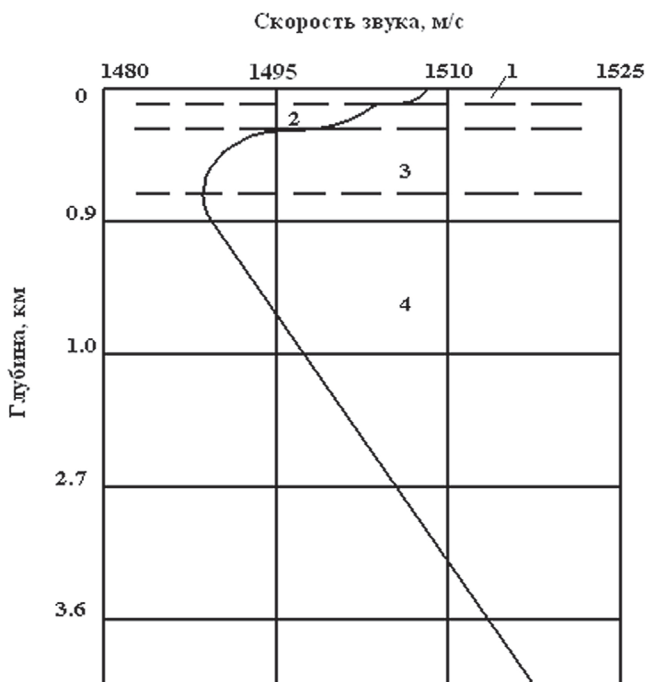


Рис. 2.6. Типичный вертикальный профиль скорости звука в океане.

- Под поверхностным слоем находится сезонный термоклин. Понятие «термоклин» означает слой воды, в котором температура изменяется с глубиной. Сезонный термоклин характеризуется отрицательным градиентом температуры и скорости звука (температура и скорость звука уменьшаются с глубиной), который зависит от времени года. Летом и осенью, когда приповерхностный слой воды в море нагрет, сезонный термоклин устойчив и имеет четкие границы. Зимой и весной, а также в Арктике он сливается с поверхностным слоем и выделить его порой невозможно.

3. Под сезонным термоклином находится основной термоклин, который подвержен незначительным сезонным изменениям. В основном термоклине наблюдается наиболее значительное изменение температуры воды по глубине.
4. Ниже основного термоклина до дна простирается глубоководный изотермический слой, имеющий почти постоянную температуру около 5 град. В этом слое скорость звука увеличивается с глубиной под влиянием гидростатического давления. В мелком море, мелководных районах и на континентальном шельфе профиль скорости звука утрачивает регулярность, присущую глубоководным районам и предсказать его форму становится очень трудно. Наблюдается значительное изменение ВРСЗ в зависимости от характера прогрева водной массы, солёности и течений. Профиль скорости звука в мелком море усложняется за счёт изменений солёности, вызванных наличием близко расположенных источников пресной воды, а также вследствие многочисленности градиентных слоев с малой пространственной и временной стабильностью.

2.5. Контрольные вопросы

1. Каковы основные факторы, определяющие ослабление акустического сигнала с расстоянием?
2. Как влияет на распространение акустического поля расширение фронта волны?
3. Какую формулу для оценки затухания звука используют для рабочего диапазона частот ГАС?
4. В чём существенное отличие отражения звука от поверхности моря и дна?
5. В чём отличие фактора фокусировки и фактора аномалии акустического поля в реальной среде?
6. Какие физические параметры водной среды определяют пространственное распределение скорости звука?
7. Какая разница изменения скорости звука по продольной, вертикальной и поперечной координатам?
8. Что такое дальняя зона акустической освещённости и каковы условия её формирования?
9. Каковы особенности распространения акустических сигналов в арктических регионах?
10. Какие способы уменьшения влияния слоя скачка скорости звука применяются в ГАС НК?
11. Каковы реальные величины расстояний до первой ДЗАО и её протяжённости в океанических приэкваториальных регионах?
12. Как изменяется глубина залегания оси подводного звукового канала с увеличением широты места?

13. В каких пределах изменяется скорость звука в океане?
14. Какой из физических параметров воды в наибольшей степени влияет на распространение акустических сигналов?
15. Как изменяется протяжённость ДЗАО с увеличением их порядка?

2.6. Практическая часть

Цель работы – Изучение свойств ППЗК.

ППЗК образуется в слоях с положительными градиентами скорости звука, толщина которых определяется сезоном года и широтой места. Зимой в высоких широтах положительные градиенты простираются от поверхности до дна с максимальным значением до $a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. В умеренных и низких широтах величины градиентов меньше, а толщины слоев не превосходят сотни метров. Скорость звука в этом случае описывается следующей функцией глубины:

$$c(z) = c(1 + az), \quad (2.15)$$

где c – скорость звука на горизонте источника, т.е. при $z = 0$.

Длина цикла луча с углом выхода α будет равна:

$$\Delta = 2 \sin \alpha / a \cos \alpha = 2 \operatorname{tg} \alpha / a. \quad (2.16)$$

Максимальная длина цикла определяется толщиной слоя:

$$\Delta_m = 2 \operatorname{tg} \alpha_m / a. \quad (2.17)$$

Угол α_m является предельным для ППЗК. Его величина связана с толщиной слоя z .

$$a_m = \sqrt{2az_m}. \quad (2.18)$$

Величина предельного угла определяет диапазон лучей, захваченных волноводом. Лучи, выходящие из источника звука при $\alpha > \alpha_m$, либо отражаются от дна, когда дно является нижней границей волновода, либо уходит в область отрицательных градиентов.

В канале происходит фокусировка энергии звукового поля. В предположении, что энергия распределяется по толщине канала равномерно, интенсивность энергии будет спадать с расстоянием по закону:

$$I = P_a \sqrt{\frac{2\Delta c/c_0}{2\pi r z_m}}, \quad (2.19)$$

где r – расстояние от источника излучения.

Основное программное обеспечение выглядит следующим образом (рис. 2.7):

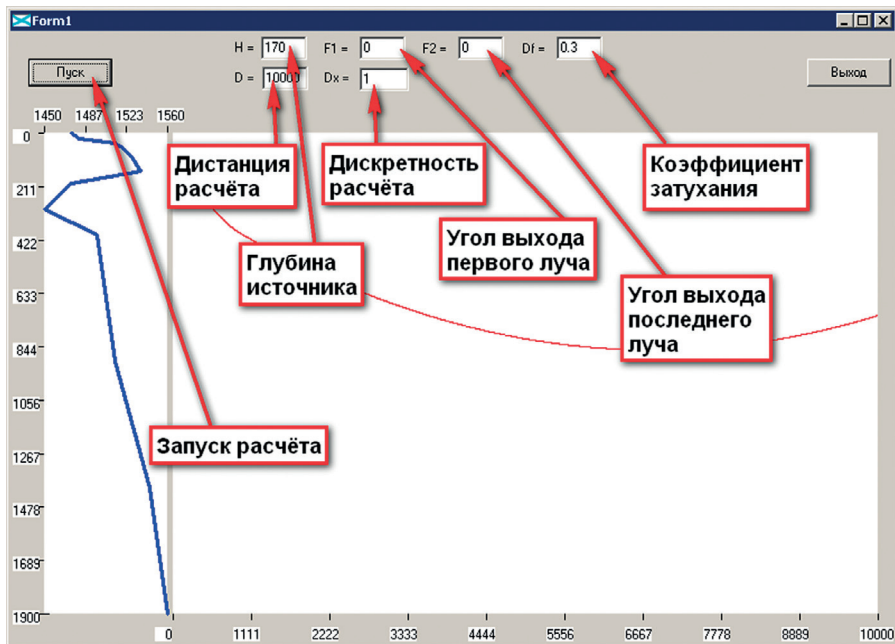


Рис. 2.7. Программное обеспечение «Refr».

Коэффициенты Df и Dx оставлять без изменения.

При исследовании ППЗК источник излучения должен находиться на поверхности океана.

При указании одинаковых коэффициентов $F1$ и $F2$ после нажатия на кнопку «Пуск» будет рассчитана траектория движения только одного луча. Если ввести начальный угол $F1 = 0$, а предельный угол $F2 = 1$, то будет построено четыре луча с углом выхода: 1) 0° ; 2) 0.25° ; 3) 0.5° ; 4) 1° , то есть лучи строятся через каждые 0.25° в указанном диапазоне (рис. 2.8).

Для того чтобы задать распределение скорости звука по глубине необходимо открыть с помощью блокнота файл «TYPE_1.RSZ» в рабочей папке программы. В этом файле вводится количество слоёв — N и скорости звука на границе каждого слоя (рис. 2.9).

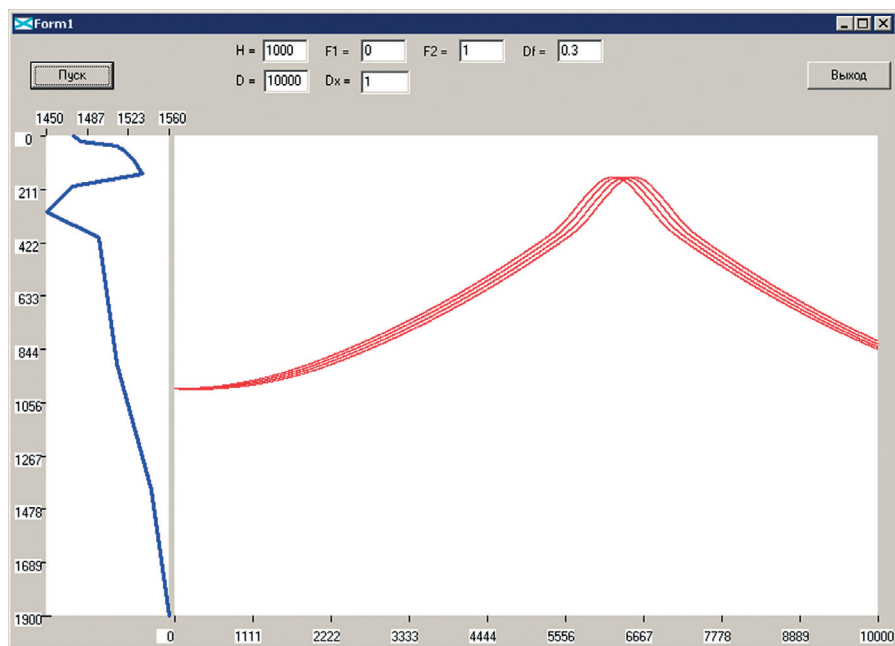


Рис. 2.8. Пример задания углов выхода нескольких лучей.

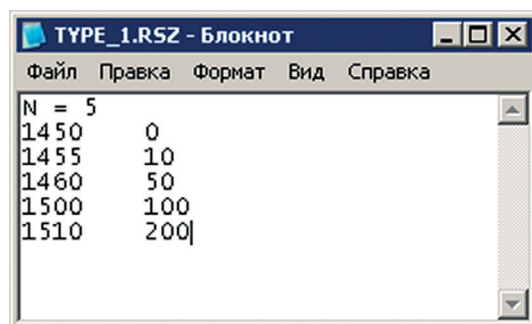


Рис. 2.9. Файл ввода ВРСЗ.

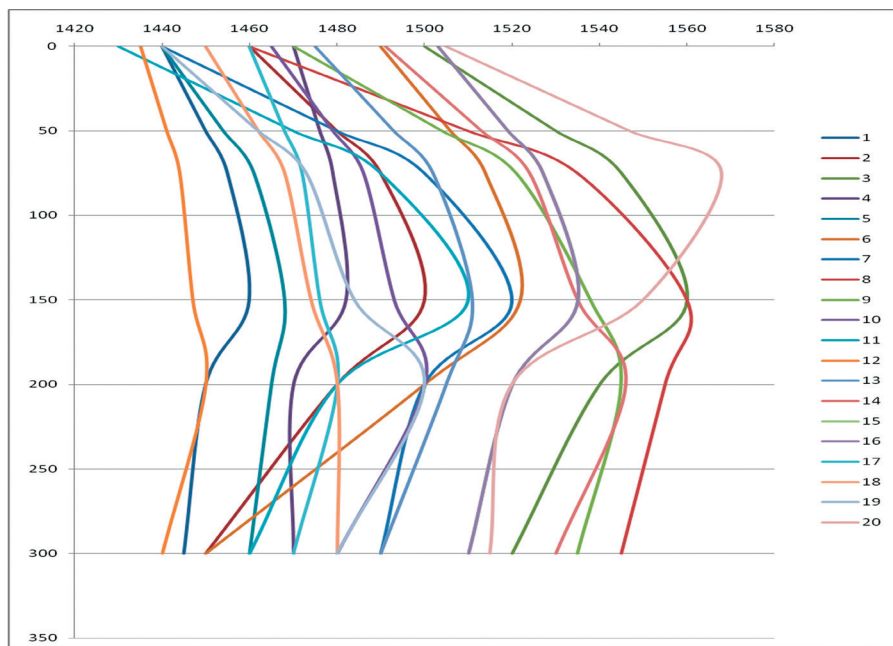


Рис. 2.10. ВРСЗ – графический вид.

2.7. Задание на выполнение

1. Найти на разрезе ППЗК.
2. Необходимо по формулам рассчитать предельный угол выхода.
3. Посчитать по формулам остальные параметры.
4. Построить луч с этим углом на данном разрезе в программе «Refr».
5. Построить несколько лучей с углами выхода большими и меньшими предельного.
6. На полученных графиках отметить дальнюю и ближнюю зоны акустической освещенности (БЗАО, ДЗАО) и зоны тени, если имеются.
7. Сделать выводы по полученным результатам.

2.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие сведения из теории.
3. Расчёт величины предельного угла.
4. Необходимые графики, полученные в программе «Refr».
5. Объяснить каждый график.
6. Выводы по полученным результатам.

2.9. Варианты распределения скорости звука по глубине

Варианты распределения скорости звука приведены на рис. 2.10.

Номер варианта	С на 0м, м/с	С на 25м, м/с	С на 50м, м/с	С на 75м, м/с	С на 150м, м/с	С на 200м, м/с	С на 300м, м/с
1	1440	1445	1450	1455	1460	1450	1445
2	1460	1470	1480	1490	1500	1480	1450
3	1500	1515	1530	1545	1560	1540	1520
4	1470	1473	1476	1479	1482	1470	1470
5	1440	1447	1454	1461	1468	1465	1460
6	1490	1498	1506	1514	1522	1500	1450
7	1440	1460	1480	1500	1520	1500	1490
8	1460	1485	1510	1535	1560	1555	1545
9	1470	1487	1504	1521	1538	1545	1535
10	1465	1472	1479	1486	1493	1500	1480
11	1430	1450	1470	1490	1510	1480	1460
12	1435	1438	1441	1444	1447	1450	1440
13	1475	1484	1493	1502	1511	1505	1490
14	1491	1502	1513	1524	1535	1546	1530
15	1503	1511	1519	1527	1535	1520	1510
16	1510	1523	1536	1549	1540	1535	1530
17	1460	1464	1468	1472	1476	1480	1470
18	1450	1456	1462	1468	1474	1480	1480
19	1440	1451	1462	1473	1484	1500	1480
20	1505	1526	1547	1568	1550	1520	1515

2.10. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА (ПЗК)

3.1. Распространение звука в глубоком море

На больших глубинах распределение скорости звука разнообразно, в связи с чем при анализе акустического поля следует различать два противоположных случая распространения звука волноводное (канальное) и антиволноводное. В первом случае значительная часть излученной энергии удерживается каналом и распространяется на большие расстояния. Во втором случае отмечается интенсивный отбор части энергии в нижележащие слои. При этом существенное влияние на долю отобранной энергии оказывает распределение скорости звука с глубиной.

3.2. Подводный звуковой канал (ПЗК)

Типичная для ПЗК лучевая картина приведена на рис. 3.1. Характер лучевой картины существенно зависит от положения излучателя относительно оси ПЗК. При размещении излучателя вблизи оси ПЗК образуется группа лучей, вдоль которых акустическая энергия распространяется на большие расстояния без потерь на границах среды. При расположении источника звука на оси ПЗК каждый луч пересекает ее на всем протяжении его траектории под углом, равным углу выхода из излучателя. Глубины проникновения лучей в области отрицательных и положительных градиентов z_m и величины полуциклов Δ определены значениями этих градиентов и остаются неизменными на всем протяжении. Поскольку значения градиентов в слое выше оси ПЗК составляют в среднем $(3...6) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, а ниже оси $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, нижние циклы лучей длиннее и дальше отходят от оси, чем верхние.

Все приведенные рассуждения справедливы для излучателя, расположенного на оси ПЗК. По мере ухода горизонта источника с оси канала в ту или другую сторону появляется группа лучей, пересекающих ось ПЗК и претерпевающих полное внутреннее отражение на горизонтах, где скорость звука определяется выражением:

$$C_r = C_0 / \cos \alpha_0. \quad (3.1)$$

Здесь C_0 — скорость звука на горизонте источника звука. Изменение горизонта излучателя приводит к формированию на оси ПЗК зон акустической тени. Удаление излучателя от оси ПЗК сопровождается уменьшением углового раствора канальных лучей. Для практических целей значительный интерес представляет усредненный закон спада интенсивности, который на больших расстояниях имеет вид:

$$I = \frac{P_a}{4\pi r_0 r} 10^{-0,1\beta r}, \quad (3.2)$$

где r_0 — переходное расстояние, начиная с которого *сферический* закон спада интенсивности сменяется *цилиндрическим*.

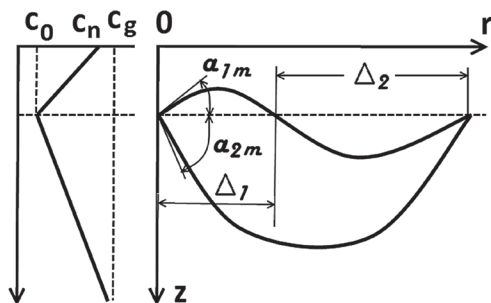


Рис. 3.1. Лучевая картина ПЗК. Источник на оси ПЗК.

Зоны конвергенции в океане. Их вырождение. Анализ лучевых картин применительно к ПЗК показывает, что при условии $сп > сд$ и размещении источника выше оси канала образуется группа лучей, периодически выходящая к поверхности. Образующиеся при этом вторичные освещенные области называются дальними зонами акустической освещенности (ДЗАО) или **зонами конвергенции**. Условия формирования этих зон и их основные параметры представляют значительный практический интерес.

На рис. 3.2 представлена зависимость $c(z)$ и лучевая картина при расположении источника звука вблизи поверхности. Лучи, ограниченные сверху значением α_{01max} и снизу α_{02max} образуют трубку, в пределах которой акустическая энергия переносится без потерь при отражении на границах среды.

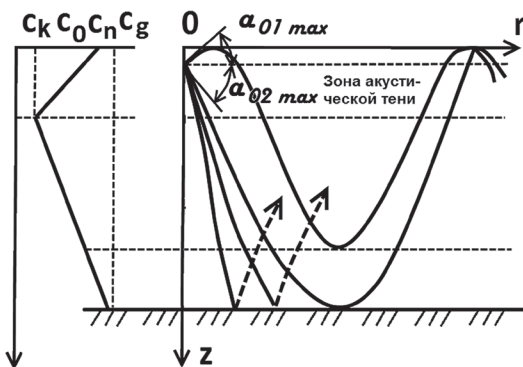


Рис. 3.2. Лучевая картина ПЗК. Источник вблизи поверхности.

Для акустического поля в этом случае характерна зональная структура поля. Ненаправленный источник звука находится в центре ближней зоны акустической освещенности (БЗАО), за которой находится протяженная зона акустической тени; за ней размещается первая зона конвергенции (1-я ДЗАО). Затем снова зона тени, вторая зона конвергенции и т.д. Схематически характер поля в условиях зональной структуры при ненаправленном источнике звука изображен на рис. 3.3.

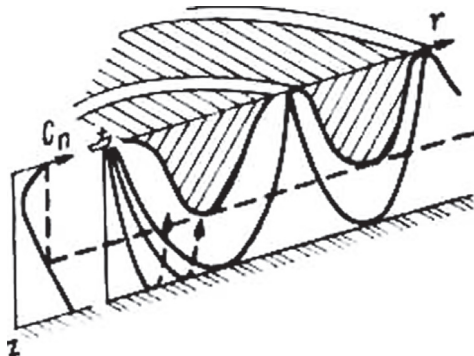


Рис. 3.3. Схематический вид пространственного распределения поля в условиях зональной структуры поля у поверхности.

Подчеркнем, что при неизменных профиле $c(z)$ и глубине океана подобное чередование зон будет перемещаться в пространстве со скоростью источника звука. При направленном источнике звука непрерывного излучения акустическое поле характеризуется энергетической трубкой определенного углового размера, вырезающей на поверхности кольцо. Элементами зон конвергенции для фиксированного горизонта наблюдения являются расстояние до зоны, протяженность и толщина. Значения элементов зон конвергенции зависят от целого ряда факторов: глубины оси ПЗК и величины $\Delta c = c_d - c_n$. Для типичных условий открытого океана расстояние до первой зоны конвергенции составляет 55 ... 70 км, до второй — 110...140 км и т.д.

Протяженность первой зоны может быть порядка 10...15 км, второй порядка 20 км. Толщина первой зоны достигает нескольких сот метров. При значительном удалении горизонта наблюдения от поверхности океана зона конвергенции разделится на две части, что соответствует восходящей и нисходящей частям пучка водных лучей. Размеры зон освещенности и тени с увеличением номера зоны постепенно изменяются: горизонтальная протяженность освещенных зон увеличивается, а протяженность и толщина зон тени сокращается. В благоприятных условиях удавалось зарегистрировать до 10...11 зон конвергенции. В дальнейшем зоны конвергенции перекрываются, образуя сплошную зону акустической освещенности.

Увеличение глубины погружения излучателя приводит к расширению зон конвергенции и соответствующему уменьшению зон тени. При размещении излучателя на оси ПЗК вся область канала оказывается засвеченной лучами. В ряде случаев зоны конвергенции могут формироваться на некоторой глубине, не выходя к поверхности океана (глубинные зоны конвергенции). Подобное явление возникает в районах океана, где скорость звука у поверхности больше скорости звука у дна $c_n > c_d$. При этом излучатель располагается на горизонтах, где скорость звука меньше скорости звука у дна.

Обязательным условием формирования вторичных освещенных зон на некоторой глубине также является наличие подводного звукового канала. Потери на распространение в условиях зональной структуры поля определяются в соответствии с выражением $ПР = -20 \lg r - \beta r + 10 \lg A_f$, где фактор аномалии A_f рассчитывается с пуском всего многообразия лучей, приходящих в точку наблюдения. Применительно к Атлантическому океану оценить возможность выхода дальних зон к поверхности и расстояние до первой зоны освещенности можно с помощью вышеприведённых формул.

Условно в гидроакустике распределения скорости звука по глубине разделяют на 7 типов (рис. 3.4). Это разделение сложилось у практиков-гидроакустиков исторически:

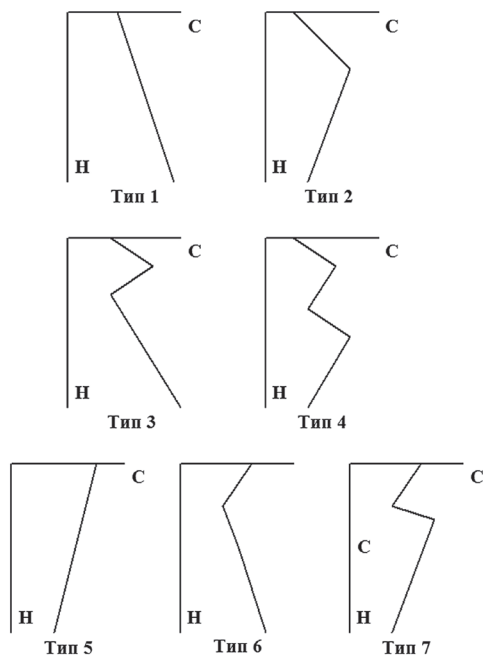


Рис. 3.4. Типы ВРСЗ.

Тип 1 — практически изотермия от поверхности до дна, т.е. положительный градиент скорости звука. Данный тип часто встречается в Северном Ледовитом океане;

Тип 2 — положительный градиент скорости звука изменяется на отрицательный при глубинах порядка десятка метров, что имеет место, когда наблюдается резкое охлаждение поверхностного и приповерхностного слоя морей;

Тип 3 — положительный градиент изменяет знак на отрицательный, а затем снова на положительный, что характерно для глубоководных районов Мирового океана в зимний или осенний периоды;

Тип. 4 — дважды происходит изменение знака градиента с положительного на отрицательный. Такое распространение скорости звука может наблюдаться в мелководных районах океана, мелком море и шельфовой зоне;

Тип 5 — уменьшение скорости звука с глубиной, что характерно для мелководных районов и в летнее время;

Тип 6 — отрицательный знак градиента изменяется на положительный. Данный тип ВРСЗ имеет место практически во всех глубоководных районах Мирового океана;

Тип 7 — отрицательный градиент изменяется на положительный, а затем вновь на отрицательный. Данный тип ВРСЗ имеет место в районах мелкого моря.

Следует отметить, что в различной литературе и описаниях боевых информационных управляющих систем (БИУС) встречается типизация, отличающаяся от вышеуказанных 7 типов, в некоторых БИУС до $19 \div 33$. Распределение ВРСЗ по 7 типам является классическим, а построение лучевых картин на ПЭВМ для любого распределения не представляет каких-либо трудностей.

3.3. Практическая часть

Цель работы — Изучение свойств ПЗК.

При расположении излучателя вблизи оси ПЗК образуется группа лучей, вдоль которых акустическая энергия распространяется на большие расстояния без потерь на границах среды. В этом случае каждый луч пересекает ось ПЗК на всем протяжении его траектории под углом, равным углу выхода из излучателя. Глубины проникновения лучей в области отрицательных и положительных градиентов z_m и величины полуциклов Δ определены значениями этих градиентов и остаются неизменными на всем протяжении. Поскольку значения градиентов в слое выше оси ПЗК составляют в среднем $(3...6) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, а ниже оси — $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, нижние циклы лучей длиннее и дальше отходят от оси, чем верхние. Значения верхнего и нижнего углов предельных лучей при постоянных градиентах скорости звука выше и ниже оси ПЗК определяются как указано ниже. Скорость звука в этом случае описывается следующей функцией глубины:

$$c(z) = c(1 + az), \quad (3.3)$$

где c — скорость звука на горизонте источника, т.е. при $z = 0$.

Максимальные длины циклов определяются толщиной слоёв

$$\Delta_{m1} = 2 \operatorname{tg} \alpha_0 / a_1, \quad (3.4)$$

$$\Delta_{m2} = 2 \operatorname{tg} \alpha_0 / a_2. \quad (3.5)$$

Углы α_{m1} , α_{m2} являются предельными для ПЗК. Их величины связаны с толщиной слоя в котором движется луч.

$$a_{1m} = \sqrt{2a_1 z_m}, \quad (3.6)$$

$$a_{2m} = \sqrt{2a_2 (H - z_0)}. \quad (3.7)$$

В канале происходит фокусировка энергии звукового поля. В предположении, что энергия распределяется по толщине канала равномерно, интенсивность энергии будет спадать с расстоянием по закону:

$$I = P_a \sqrt{\frac{2\Delta c / c_0}{2\pi r z_m}}, \quad (3.8)$$

где r — расстояние от источника излучения.

3.4. Порядок выполнения работы

1. Найти на разрезе ПЗК.
2. Необходимо по формулам рассчитать предельные углы выхода.
3. Посчитать по формулам остальные параметры.
4. Построить лучи с этими углами на данном разрезе в программе «Refr».
5. Построить несколько лучей с углами выхода большими и меньшими предельного.
6. На полученных графиках отметить зоны тени, зоны БЗАО и ДЗАО, если имеются.
7. Сделать выводы по полученным результатам.

3.5. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Краткие сведения из теории.
3. Расчёт величины предельного угла.

4. Необходимые графики, полученные в программе «Refr».
5. Объяснить каждый график.
6. Выводы по полученным результатам.

3.6. Варианты распределения скорости звука по глубине

Варианты распределения скорости звука приведены на рис 3.5.

Номер варианта	С на 0 м, м/с	С на 50 м, м/с	С на 100 м, м/с	С на 150 м, м/с	С на 300 м, м/с	С на 700 м, м/с	С на 1200 м, м/с
1	1500	1445	1450	1465	1485	1450	1445
2	1510	1470	1480	1490	1500	1480	1450
3	1520	1515	1510	1545	1560	1540	1520
4	1530	1515	1490	1479	1500	1470	1470
5	1540	1530	1460	1465	1480	1500	1460
6	1500	1490	1483	1480	1522	1530	1550
7	1525	1510	1490	1485	1500	1510	1515
8	1529	1500	1500	1510	1520	1540	1556
9	1545	1540	1535	1530	1525	1540	1550
10	1550	1548	1545	1540	1520	1525	1535
11	1480	1478	1474	1472	1510	1520	1525
12	1490	1480	1470	1460	1450	1490	1520
13	1495	1484	1472	1460	1490	1505	1520
14	1491	1460	1440	1515	1535	1546	1525
15	1527	1511	1500	1480	1535	1520	1510
16	1543	1523	1515	1500	1450	1515	1530
17	1517	1510	1500	1490	1476	1480	1490
18	1498	1495	1490	1480	1470	1505	1490
19	1523	1490	1462	1473	1484	1500	1480
20	1515	1510	1500	1480	1530	1520	1515

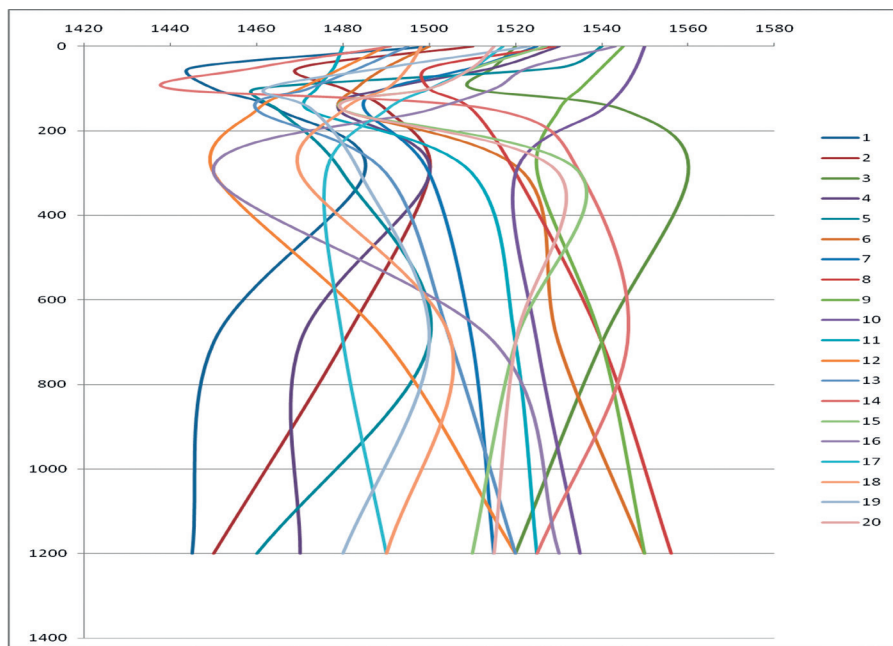


Рис. 3.5. ВРСЗ – графический вид.

3.7. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №4 РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОЛОКАТОРА

4.1. Общие положения

Между областью акустической тени и областью акустически освещенной существует достаточно резкая граница, которая в ряде случаев является границей дальности действия гидроакустических приборов. В связи с этим вводится понятие *геометрической дальности действия*, под которой подразумевается расстояние от источника звука до границы тени.

Важно отметить, что геометрическая дальность непосредственно не связана с понятием энергетической дальности, так как граница тени зависит от значения градиента скорости звука, от характера вертикального распределения скорости звука, от угла выхода луча из источника и практически не зависит от мощности источника.

4.2. Отрицательная рефракция. Поле в области тени

Наиболее неблагоприятным для целей гидролокации является случай отрицательной рефракции — искривление акустических лучей в сторону дна под влиянием уменьшающейся скорости звука с глубиной.

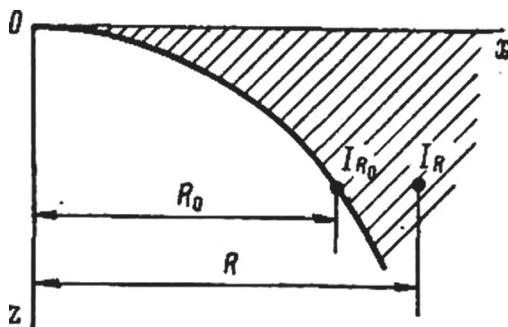


Рис. 4.1. К определению интенсивности звука в области тени.

В мировом океане подобное распределение скорости звука встречается достаточно часто. При отрицательной рефракции к акустически освещенной зоне прилегает область акустической тени (заштрихованная часть рис. 4.1).

Теоретически, на основе волновой теории, можно показать, что при отсутствии отражений от дна и поверхности и при условии линейного уменьшения скорости звука с глубиной интенсивность звука в области тени, по

мере удаления от границы тени, убывает очень быстро. Это убывание определяется следующими формулами:

$$J_R = J_{R_0} (R_0 / R) e^{-A(R-R_0)}, \quad (4.1)$$

$$A = (3 / C_0) C_C^{2/3} f^{1/3} \text{ непер / см}, \quad (4.2)$$

или

$$A = (25,8 / C_0) G_C^{2/3} f^{1/3} \text{ дБ / см}, \quad (4.3)$$

где J_R — сила звука в области тени в точке, удаленной от источника на горизонтальное расстояние R ; J_{R_0} — сила звука на границе тени в точке, удаленной от источника на горизонтальное расстояние R_0 ; C_0 — скорость звука на уровне источника, м/с; G_C — градиент скорости звука; f — частота, Гц.

Вычисленные значения коэффициента A в функции частоты и градиента скорости звука приведены на рис. 4.2. Мы видим, что, например, при частоте 1 кГц и градиенте температуры $G_t = 0,1$ град/м (соответственно при градиенте скорости звука $G_C = 0,35$ 1/с) ослабление силы звука составляет приблизительно 100 дБ/км.

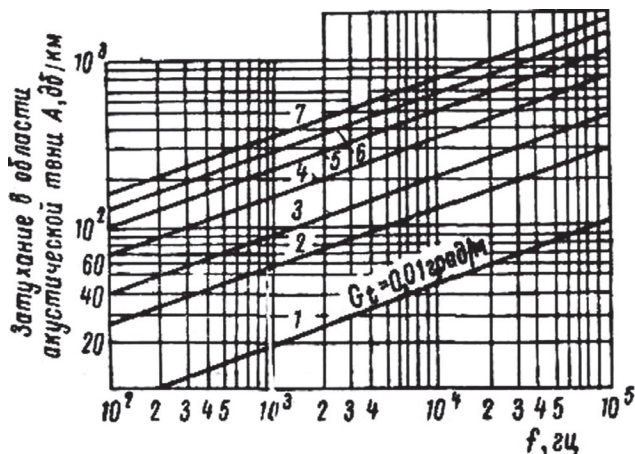


Рис. 4.2. Затухание звука в области тени в зависимости от частоты для различных значений градиента скорости звука.

1 — $G_t = 0,01$ град/м ($G_C = 0,035$ 1/с);

2 — $G_t = 0,05$ град/м ($G_C = 0,175$ 1/с);

3 — $G_t = 0,1$ град/м ($G_C = 0,35$ 1/с);

4 — $G_t = 0,2$ град/м ($G_C = 0,7$ 1/с);

$$5 - G_t = 0,4 \text{ град/м } (G_c = 1,4 \text{ 1/с});$$

$$6 - G_t = 0,6 \text{ град/м } (G_c = 2,1 \text{ 1/с});$$

$$7 - G_t = 0,8 \text{ град/м } (G_c = 2,8 \text{ 1/с}).$$

Такое быстрое убывание силы звука означает, что между областями акустической тени и акустически освещенной существует граница, которая практически часто оказывается границей дальности действия гидроакустических приборов.

В действительных условиях столь сильного затухания в области тени не существует, поскольку в зону тени проникает акустическая энергия за счет отражения звука от дна и рассеяния на неровной поверхности моря. Кроме того, если ниже области, в которой звук с глубиной убывает, простирается среда, в которой скорость звука с глубиной возрастает, то в этом случае в зону тени дифрагирует акустическая энергия из нижних слоев. В результате затухание в области тени в реальных условиях значительно меньше указанного.

Это дает основание ввести понятие геометрической дальности действия, под которой подразумевается горизонтальное расстояние от источника звука до границы тени. Соответствующие пояснения даются на рис. 4.3, а, б.

Рассматривая случай линейного распределения скорости звука по глубине и учитывая, что траекторией луча здесь является окружность радиуса $\rho = C_0/G_c$ для геометрической дальности D_Γ получим:

$$D_\Gamma = \rho^2 - (\rho - h_2)^2. \quad (4.4)$$

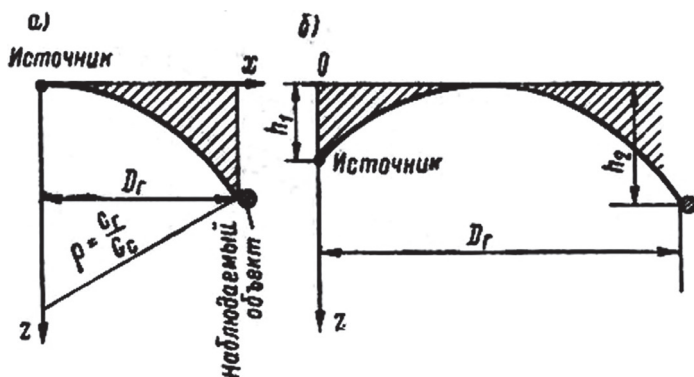


Рис. 4.3. К определению геометрической дальности действия (а — источник на поверхности, б — источник на глубине h_1).

или

$$D_\Gamma = \sqrt{(2\rho h_2 - h_2^2)} \approx \sqrt{2\rho h_2}. \quad (4.5)$$

Так как $\rho = C_0/G_c$ то окончательно имеем:

$$D_r \approx \sqrt{\frac{2C_0 h_2}{G_c}}, \quad (4.6)$$

где C_0 — скорость звука на уровне источника; h_2 — глубина погружения объекта.

Значение геометрической дальности может значительно возрасти, если источник звука углубить. При этом геометрическую дальность определяют по лучу, претерпевающему полное внутреннее отражение у поверхности моря (рис. 4.3, б). Для этого случая:

$$D_r \approx \sqrt{\frac{2C_0}{G_c}} \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (4.7)$$

где h_1 — заглубление источника звука.

4.3. Контрольные вопросы

1. Что такое геометрическая дальность действия гидролокатора?
2. От чего зависит геометрическая дальность действия гидролокатора?
3. Как зависит геометрическая дальность действия гидролокатора от мощности (интенсивности) излучённого акустического сигнала?
4. Что такое рефракция?
5. Под каким углом необходимо выпустить луч для определения геометрической дальности действия гидролокатора?
6. За счёт каких явлений затухание в зоне тени для реальных условий меньше чем 100 дБ/км?

4.4. Практическая часть

Цель работы — Исследовать зависимость геометрической дальности действия гидролокатора от положений источника звука и объекта лоцирования.

При помощи программного комплекса *MatLab* произвести исследование зависимости дальности действия гидролокатора от положений источника звука и объекта лоцирования, для чего необходимо построить не менее 6 графиков-зависимостей:

- 1) взять несколько фиксированных положений объекта лоцирования и вычислить все дальности для всех возможных положений источника с дискретностью 1м;
- 2) взять несколько фиксированных положений источника и вычислить все дальности для всех возможных положений объекта лоцирования с дискретностью 1м;

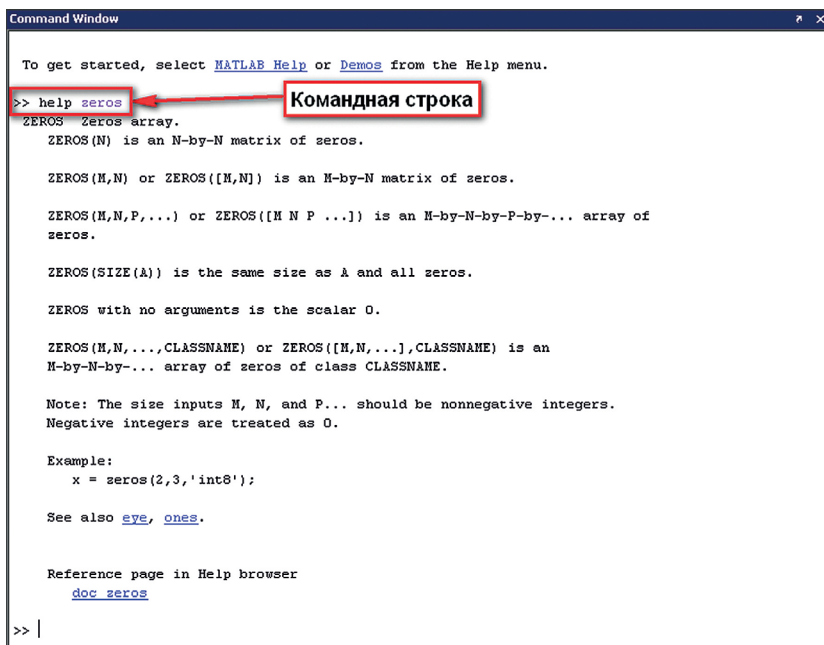
- 3) для каждого графика написать краткие выводы;
- 4) письменно ответить на контрольные вопросы;
- 5) составить отчёт по аналогии с предыдущими лабораторными работами.

Задание можно выполнять как в командной строке *MatLab* так и в редакторе *m*-файлов.

Команды *MatLab*, которые могут понадобиться при выполнении лабораторной работы:

- 1) *zeros* — задание нулевого массива;
- 2) *for* — задание цикла;
- 3) *sqrt* — вычисление корня;
- 4) *plot* — построение графиков;
- 5) *ylabel* — задание название для оси Y;
- 6) *xlabel* — задание название для оси X;
- 7) *title* — задание названия графика;
- 8) *figure* — открытие нового окна для построения графика;
- 9) для того чтобы посмотреть синтаксис команд нужно набрать в командной строке «*help пробел ИМЯ КОМАНДЫ*».

Пример использования подсказки для команды *zeros* показан на рис 4.4.



```
Command Window

To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

>> help zeros
ZEROS zeros array.
ZEROS(N) is an N-by-N matrix of zeros.

ZEROS(M,N) or ZEROS([M,N]) is an M-by-N matrix of zeros.

ZEROS(M,N,P,...) or ZEROS([M N P ...]) is an M-by-N-by-P-by-... array of
zeros.

ZEROS(SIZE(A)) is the same size as A and all zeros.

ZEROS with no arguments is the scalar 0.

ZEROS(M,N,...,CLASSNAME) or ZEROS([M,N,...],CLASSNAME) is an
M-by-N-by-... array of zeros of class CLASSNAME.

Note: The size inputs M, N, and P... should be nonnegative integers.
Negative integers are treated as 0.

Example:
    x = zeros(2,3,'int8');

See also eye, ones.

Reference page in Help browser
doc zeros

>> |
```

Рис. 4.4. Командная строка в окне команд *MatLab*.

4.5. Варианты

Номер варианта	C_0 , м/с	G_c , л/с	Толщина слоя, м
1	1445	0,25	300
2	1470	0,18	350
3	1515	0,35	380
4	1515	0,76	400
5	1490	2,11	500
6	1510	2,82	600
7	1500	0,43	700
8	1540	0,48	800
9	1548	4,35	900
10	1478	3,73	1000
11	1480	2,71	950
12	1484	3,98	750
13	1460	1,43	650
14	1511	2,48	450
15	1510	1,35	250
16	1495	2,73	550
17	1490	4,71	850
18	1510	0,98	635

4.6. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №5

ГРАДУИРОВКА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы — Градуировка гидроакустического приемника методом добавочного электрода.

5.1. Основные положения

Одним из методов определения абсолютной чувствительности гидроакустических приемников является электростатический метод или метод дополнительного электрода. Градуировка производится в воздухе. Мембрана градуируемого приемника устанавливается на расстоянии d от поверхности дополнительного электрода. К мембране и электроду подводятся рабочее напряжение $U_{\approx}$ и напряжение поляризации $U_{=}$ (рис. 5.1).

Элементы схемы L и C разделяют цепи питания.

Между мембраной приемника и добавочным электродом приложено напряжение:

$$U = U_{=} + U_m \sin \omega t,$$

где $U_{=}$ — постоянное напряжение поляризации; $U_{\approx} = U_m \sin \omega t$ — мгновенное значение переменного напряжения.

Под действием приложенных напряжений мембрана будет притягиваться к электроду вследствие действия электростатических сил, величина которых для плоского конденсатора выражается формулой:

$$F = \frac{\varepsilon U^2 S}{8\pi d^2},$$

где S — площадь электрода, м^2 ; d — ширина воздушного зазора между мембраной приемника и плоскостью электрода, м ; ε — диэлектрическая постоянная в вакууме.

$$\varepsilon = 1,11 \cdot 10^{-10}, \text{ Ф/м.}$$

Тогда

$$F = \frac{\varepsilon S}{8\pi d^2} (U_{=} + U_m \sin \omega t)^2.$$

Величины $U_{=}$ и $U_{\approx}$ выбираются такими, чтобы $U_{=} \gg U_{\approx}$.

Преобразовывая полученное выражение, получим:

$$F = \frac{\varepsilon S}{8\pi d^2} U_{=}^2 + \frac{\varepsilon S}{4\pi d^2} U_{=} U_m \sin \omega t + \frac{\varepsilon S}{8\pi d^2} U_m^2 \sin^2 \omega t.$$

Первый член выражения характеризует постоянную составляющую электростатической силы, не вызывающей избыточного давления и, соответственно, ЭДС на выходе приемника. Третьим членом можно пренебречь, так как он имеет двойную частоту и несет малую часть энергии. Второй член описывает ту составляющую электростатической силы, которая и создает переменное давление частоты на приемник.

Если S — внешняя площадь мембраны, то амплитуда эквивалентного акустического давления на мембране будет:

$$P_m = \frac{F}{S}$$

или преобразовывая,

$$P_m = \frac{\varepsilon U_{\approx} U_{\approx}}{4\pi d^2}.$$

Переходя от амплитудных значений P_m и U_m к их эффективным значениям, окончательно имеем:

$$P_m = \frac{\varepsilon U_{\approx} U_{\approx}}{4\pi d^2}, \text{ Н/м}^2$$

или

$$P_m = \frac{8,85 U_{\approx} U_{\approx}}{d^2} \cdot 10^{-12}, \text{ Н/м}^2,$$

где P — эффективное давление в ньютонах на кв.метр; $U_{\approx}$ — постоянное поляризующее напряжение в вольтах; $U_{\approx}$ — эффективное значение переменного напряжения в вольтах; d — зазор между мембраной и электродом в метрах.

Как видно, эффективное значение эквивалентного звукового давления не зависит от частоты, что является важным преимуществом данного метода градуировки.

5.2. Описание экспериментальной установки

Градуировка гидроакустического приемника выполняется методом добавочного электрода. Схема установки содержит:

1. Кристаллический приемник.
2. Добавочный электрод с устройством крепления (ДЭ).
3. Генератор звуковой частоты (ГЗЧ).
4. Измерительный усилитель (ИУ).
5. Выпрямитель поляризации (ВП).

Градуируется гидроакустический приемник с плоской мембраной. Схема установки представлена на рис. 5.1.

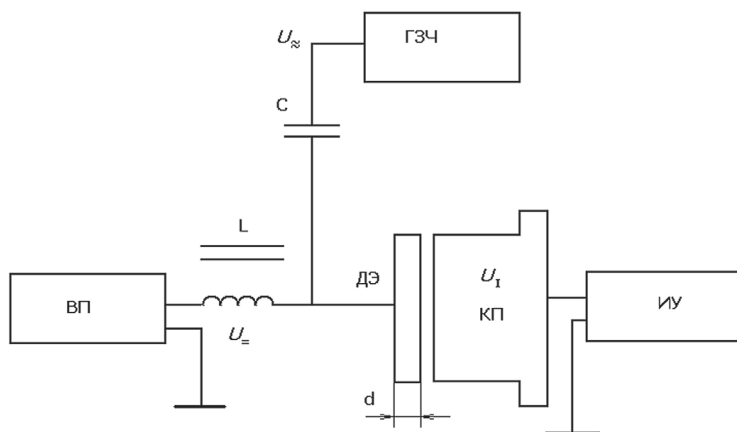


Рис. 5.1. Схема установки.

5.3. Порядок выполнения работы

1. Закрепить исследуемый приемник так, чтобы воздушный зазор между его мембраной и добавочным электродом составлял одну десятую долю миллиметра.
2. Подать напряжение поляризации $U_{\text{п}} = 600 \text{ В}$.
3. Подать переменное напряжение $U_{\text{з}} = 15 \text{ В}$.
4. Изменяя частоту генератора и поддерживая $U_{\text{з}} = \text{const}$, измерить напряжение, развиваемое приемником $U_{\text{п}}$.
5. Рассчитать чувствительность приемника γ .
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.
Приемник «Марс».

$U =$ $U_{\text{з}} =$ $d =$ $P =$

$f, \text{ Гц}$	$U_{\text{п}}, \text{ мкВ}$	$\gamma = U_{\text{п}}/P, \text{ В/м}^2$

7. По результатам расчета построить частотную характеристику (рис. 5.2).

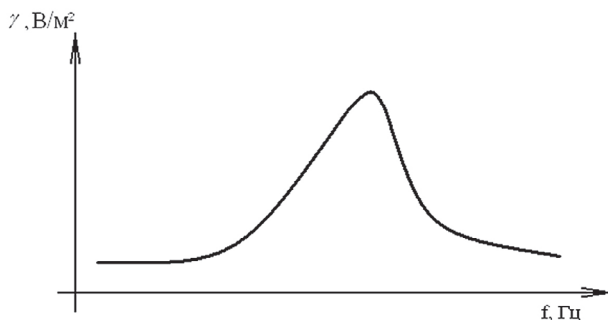


Рис. 5.2. Частотная характеристика.

5.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Результаты расчетов.
5. Краткие выводы.

5.5. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. — Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. — СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы — Определение параметров пьезоэлектрического преобразователя методом круговых диаграмм.

6.1. Основные положения

Одним из наиболее распространенных методов определения параметров пьезоэлектриков является метод круговых диаграмм. Суть его состоит в следующем: исследуется зависимость комплексного сопротивления преобразователя, работающего в воздухе, от частоты.

Так как сопротивление нагрузки при работе преобразователя в воздухе практически равно нулю, то вид указанной зависимости полностью определяется параметрами преобразователя. В частности, по характерным точкам указанной диаграммы, а именно, по значениям резонансных частот, можно определить такой важный показатель пьезоэлектрических свойств преобразователя, как коэффициент электромеханической связи и через него рассчитать остальные, интересующие нас параметры пьезоэлектрика. Само название метода обусловлено тем, что форма диаграммы комплексного сопротивления имеет вид окружности.

Связь между различными параметрами пьезоэлектрика, а также форма диаграммы комплексного сопротивления могут быть установлены с помощью электромеханической схемы ненагруженного преобразователя (преобразователя, работающего в воздухе) (Рис. 6.1).

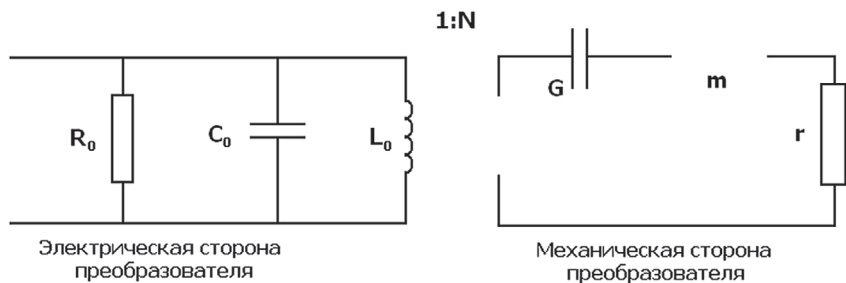


Рис. 6.1. Схема преобразователя.

На данной схеме приняты следующие обозначения:
 R_0 — сопротивление диэлектрических потерь; C_0 — емкость механически зажатого пьезоэлектрика; L_0 — индуктивность преобразователя; G — механическая гибкость преобразователя; m — масса колебательной системы;

r — сопротивление механических потерь; N — коэффициент электромеханической трансформации.

Схема преобразователя может быть заменена эквивалентной электрической схемой (Рис. 6.2):

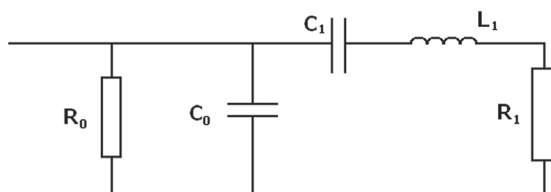


Рис. 6.2. Эквивалентная электрическая схема преобразователя.

Значения параметров C_1 , L_1 , R_1 , описывающих механический колебательный контур преобразователя, определяются соотношениями:

$$C_1 = CN^2,$$

$$L_1 = m / N^2,$$

$$R_1 = r_1 / N^2.$$

Анализ эквивалентной электрической схемы преобразователя указывает на наличие 2-х резонансных частот. Первая из этих частот соответствует резонансу механического (последовательного) колебательного контура C_1 , L_1 , R_1 . Значение частоты механического резонанса равно:

$$f_{\text{пос}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}.$$

Вторая резонансная частота соответствует резонансу параллельного колебательного контура C_0 , C_1 , L_1 , R_1 . Ее значение равно:

$$f_{\text{пар}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_{\dots}}},$$

$$C_{\dots} = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}.$$

Так как $C_1 > C_{\dots}$, то $f_{\text{пос}} < f_{\text{пар}}$.

Для определения резонансных частот $f_{\text{пос}}$ и $f_{\text{пар}}$ можно воспользоваться тем свойством, что при последовательном резонансе модуль полного сопротивления излучателя близок к минимальному значению, а при параллельном — к максимальному.

Коэффициент электромеханической связи (k) выражается через резонансные частоты следующим образом:

$$k^2 = \frac{f_{\text{пар}}^2 - f_{\text{пос}}^2}{f_{\text{пар}}^2}.$$

Пьезоэлектрическая постоянная материала преобразователя (e) рассчитывается по формуле:

$$e = k \sqrt{\varepsilon^T E_p^E}, \quad (6.1)$$

где ε^T — диэлектрическая проницаемость свободного пьезоэлектрика, E_p^E — модуль упругости (модуль Юнга) пьезоэлектрика в режиме холостого хода.

Для пьезоэлектрического модуля имеем:

$$d = \frac{e}{E_p^E}.$$

6.2. Описание экспериментальной установки

В работе исследуется пьезокерамический излучатель из титаната бария, имеющий форму цилиндра, на внешнюю и внутреннюю поверхности которого нанесены электроды. Внешний вид излучателя приведен на рис. 6.3.

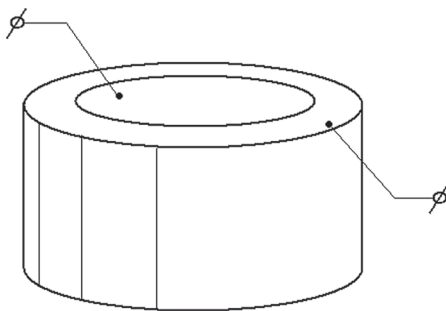


Рис. 6.3. Внешний вид излучателя.

Основные характеристики излучателя:

Внешний диаметр цилиндра $D_{\text{max}} = 117$ мм;

Внутренний диаметр цилиндра $D_{\text{min}} = 104,6$ мм;

Высота цилиндра $H = 60$ мм;

Плотность пьезокерамики $\rho_0 = 5,2 \cdot 10^3$ кг/м³;

Масса излучателя $m = 0,8$ кг;

Электрическая емкость механически зажатого преобразователя $C^T = 0,0314$ мкф. Эта емкость равна емкости конденсатора, состоящего из 2-х цилиндрических пластин. Она рассчитывается по формуле:

$$C^T = \frac{2\pi H}{D_{\max}/D_{\min}} \varepsilon^T,$$

где ε^T – диэлектрическая проницаемость зажатого пьезоэлектрика.

Для построения диаграммы, характеризующей зависимость комплексного сопротивления от частоты, используется схема, представленная на рис. 6.4.

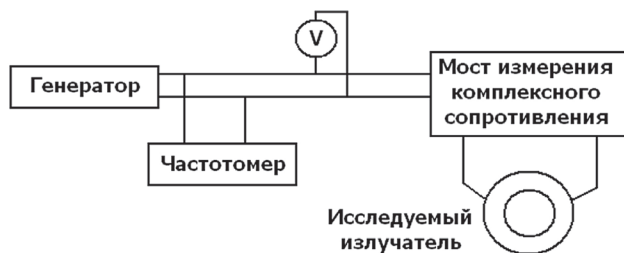


Рис. 6.4. Схема измерительной установки.

Данная схема включает:

- генератор звуковых частот;
- мост для измерения комплексного сопротивления;
- частотомер;
- вольтметр;
- исследуемый пьезоэлектрический преобразователь.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Изменяя частоту генератора в пределах от 11000 до 13000 Гц с шагом 100 Гц, измерить модуль и фазу (с учетом знака) полного (комплексного) сопротивления излучателя. При изменении частоты контролировать постоянство выходного напряжения генератора с помощью вольтметра. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерения

№ п/п	f_z , Гц	Z , Ом	φ , град	$R = Z \cos \varphi$, Ом	$X = Z \sin \varphi$	Примечание
1.						
2.						
3.						
.						
.						
.						

- По результатам измерений построить диаграмму сопротивлений излучателя, примерный вид которых приведен на рис. 6.5.

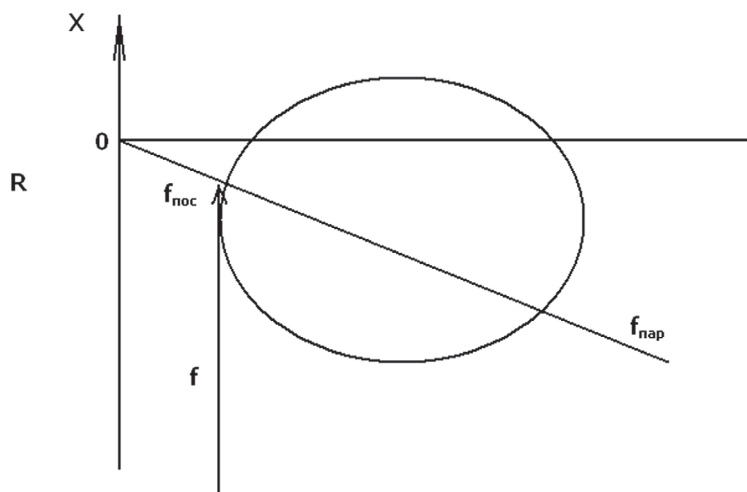


Рис. 6.5. Примерный вид диаграммы сопротивлений излучателя.

- По характерным точкам круговой диаграммы, соответствующим минимальному и максимальному значениям модуля полного сопротивления, определить частоты последовательного и параллельного резонансов.
- Определить коэффициент электромеханической связи:

$$k = \sqrt{\frac{f_{\text{пар}}^2 - f_{\text{пос}}^2}{f_{\text{пар}}^2}}. \quad (6.2)$$

- Используя формулу (6.1), рассчитать диэлектрическую проницаемость механически зажатого пьезоэлектрика:

$$\epsilon^T = \frac{C^T \cdot \ln \frac{D_{\text{max}}}{D_{\text{min}}}}{2\pi H}, \text{ Кл/В}. \quad (6.3)$$

- Определить модуль упругости пьезокерамики в режиме короткого замыкания:

$$E_p^E = \left(\pi D_{\text{ср}} f_{\text{пос}} \right)^2 = C_{\dots}^2, \text{ Н/м}^2, \quad (6.4)$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр цилиндра.

7. Вычислить пьезоэлектрическую постоянную (e) и пьезоэлектрический модуль (d):

$$e = k \sqrt{\varepsilon^T E_p^A},$$

$$d = \frac{e}{E_p^A}.$$

6.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Результаты расчетов.
5. Краткие выводы.

6.5. Литература

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: изд. ГЭТУ, 1996.

Лабораторная работа №7

ПРИМЕНЕНИЕ САМОПИСЦЕВ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ

Цель работы – определение параметров самописца уровня напряжения.

7.1. Основные положения

Самописец типа 2305 предназначен для точной записи уровней сигналов в диапазоне частот от 10 Гц до 200 кГц. Типичные области применения: запись частотных характеристик, кривых реверберации, уровней шумов и вибраций, спектрограмм и диаграмм направленности.

Запись может производиться с помощью чернил на диаграммной бумаге с обычной или частотной градуировкой или с помощью сапфировой иглы на восковой бумаге.

Работа самописца основана на принципе компенсационной следящей системы. Когда величина напряжения, приложенного к входным зажимам, изменяется, то через катушку возбуждения пишущего механизма начинает течь ток и перо, механически связанное с компенсационным потенциометром, начинает перемещаться. При перемещении пера напряжение, снимаемое с потенциометра на вход усилителя, изменяется до тех пор, пока не наступит новое стабильное состояние. При этом возможно получить запись в различных диапазонах напряжения, используя различные компенсационные потенциометры.

Электрическая часть самописца типа 2305 состоит из входной схемы, компенсационного потенциометра, входного усилителя переменного тока с непосредственными межкаскадными связями, специального выпрямительного устройства и специального выходного усилителя постоянного тока, который приводит в действие электродинамический пишущий механизм.

7.2. Описание экспериментальной установки

Измерительная установка для проведения работы представлена на рис. 7.1. Исследуется самописец уровня напряжения типа 2305. Функции лампового вольтметра может выполнять встроенный измерительный прибор генератора электрических сигналов. Размыкание ключа «К» можно имитировать нажатием кнопки отключения сигнала на передней панели генератора.

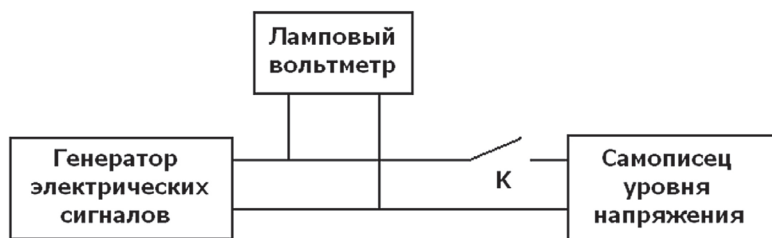


Рис. 7.1. Схема измерительной установки.

7.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание самописца уровня напряжения.
2. Ознакомиться с конструкцией самописца, обратив внимание на электромеханическую записывающую систему, функциональные потенциометры и элементы управления самописцем.
3. Подключить к самописцу генератор электрических сигналов. Вращая регулятор выходного напряжения генератора, заметить характер движения пера (при малой скорости движения бумаги).
4. Определить точность регистрации уровня напряжения исследуемым самописцем, пользуясь схемой на рис. 7.1.

Работа выполняется путем последовательной установки по ламповому вольтметру напряжения с выхода генератора и записи уровня этого напряжения на ленте самописца. Перед началом измерений следует произвести калибровку самописца в следующем порядке:

1. Установить ручку «Входной аттенюатор» на 0.
2. Установить ручку «Динамический диапазон» на 50.
3. Установить ручку «Тип выпрямления» на «эффективно» RMS.
4. Установить ручку «Нижняя предельная частота» на 20.
5. Установить ручку «Скорость записи» на 160 мм/с (большие цифры) для бумаги шириной 50 мм; 315 мм/с (малые цифры) для бумаги шириной 100 мм.
6. Установить ручку «Привод бумаги» на «Стоп» и «Прямой».
7. Убедиться, что кнопка «Одна диаграмма — Непрерывная запись» находится в опущенном (верхнем) положении.
8. Установить ручку «Сеть» на «Оп» (Вкл).
9. Установить ручку «Двигатель» на «Оп» (Вкл).
10. Выждать несколько минут для прогрева прибора.
11. Нажать кнопку «100 мВ Ref.» и подогнать отклонение пишущего пера с помощью ручки «Входной потенциометр» к линии 20 дБ на бумаге.

Теперь самописец откалиброван таким образом, что напряжение, приложенное к его входу, будет записываться в дБ относительно 10 мВ (нулевая линия на амплитудной шкале бумаги соответствует 10 мВ).

При калибровке необходимо пользоваться логарифмическим потенциометром 50 дБ. После калибровки ручку входного потенциометра не трогать во избежание нарушения калибровки.

12. Для определения точности регистрации уровня напряжения самописцем устанавливаются величины контрольного напряжения с интервалом в 10 дБ (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

Соотношение уровня и напряжения

дБ	0	10	20	30	40	50
В	0,01	0,0317	0,1	0,317	1,0	3,17

13. Регистрацию уровня напряжения следует осуществлять при малой скорости движения ленты (3 мм/с) так, чтобы длина ленты с полной записью не превышала ширины тетрадного листа. По окончании записи лента с результатами записи отрывается для помещения в отчет ($f = 1000$ Гц).
14. С помощью миллиметровой линейки на записи следует определить уровень напряжения в каждой точке записи.
15. Сравнение величин $U_{\text{вх.}}$ (дБ) и измеренной $U_{\text{из.}}$ (дБ) позволит определить абсолютную погрешность измерений самописца в логарифмическом масштабе (дБ). Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты измерений

№ п/п	$U_{\text{вх.}}$ (дБ)	$U_{\text{из.}}$ (дБ)	$\Delta U(\text{дБ}) = U_{\text{вх.}} - U_{\text{из.}}$

16. Определить время переходного процесса электромеханической следящей системы самописца.
17. Регулятором выходного напряжения генератора перо самописца установить на уровень напряжения в 50 дБ. На максимальной скорости движения ленты самописца разомкнуть ключ К. Переходный процесс установления нулевого уровня зафиксируется пером самописца (рис. 7.2).

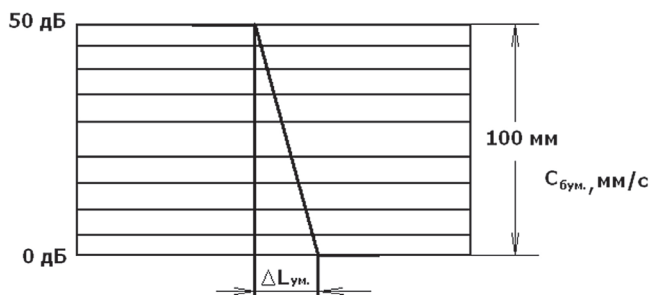


Рис 7.2. Перо самописца.

Аналогичные измерения проделать для случая переходного процесса при регистрации максимального уровня (рис. 7.3).

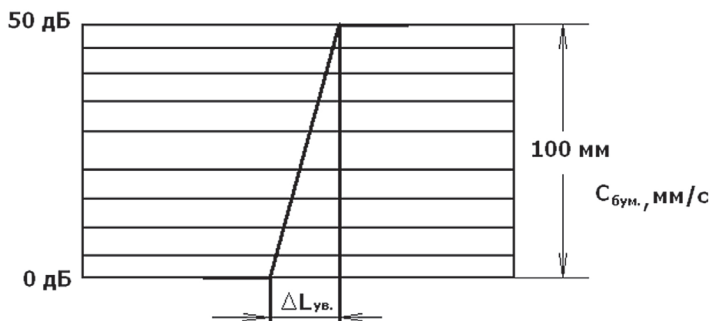


Рис. 7.3. Регистрация максимального уровня.

Время переходного процесса при увеличении и уменьшении напряжения определяется из известного соотношения. Работу проделать для случая минимального и максимального демпфирования электрической и электромеханической следящей системы самописца. Ленту с записями переходных процессов привести в отчете.

18. Записать на ленту частотную характеристику самописца, для чего подать на вход самописца 0,1 В (20 дБ) и изменять частоту по точкам 0,02; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 50; 100; 150; 200 кГц. Скорость движения бумаги при снятии характеристики – 3 мм/с.

Данные эксперимента сравнить с паспортными данными самописца.

19. Произвести запись на ленту шириной 100 мм медленно изменяющихся процессов в диапазоне частот от 0,02 до 4 Гц. При этом переключатель рода работы необходимо поставить в положение «Постоянный ток». Ленту с записью привести в отчете.

7.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Результаты расчетов.
5. Краткие выводы.

7.5. Список литературы

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. – СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.
4. Самописец уровня типа 2305. Описание и применение. Брюль и Кьер, 1969.

Лабораторная работа №8

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА И ПРОВОДИМЫХ В НЕМ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы — ознакомление со свойствами лабораторного гидроакустического бассейна и оценка его качества.

8.1. Основные положения

В заглушённых гидроакустических бассейнах высокое качество измерений достигается благодаря созданию в них поля бегущих волн, т.е. волн, свободных от влияния отражений. Для создания поля бегущей волны в измерительном бассейне необходимо устранить отражение от стенок, дна и поверхности воды. Это достигается путем покрытия дна, поверхности воды и стенок бассейнов с внутренней стороны специальным звукопоглощающим покрытием, обеспечивающим во всем рабочем диапазоне частот эффективное поглощение (до 95 %) звука.

Для надежного измерения в бассейне необходимо, чтобы измеряемое давление на приемнике было, по крайней мере, на 10 дБ выше собственного уровня помех.

В соответствии с определением можно записать:

$$I = \frac{P_a}{4\pi r^2} + \frac{P_a(1-a_i)}{S},$$

где I — интенсивность звука; $\frac{P_a}{4\pi r^2}$ — интенсивность прямой волны; $\frac{P_a(1-a_i)}{S}$ —

интенсивность отраженной волны от поверхности бассейна; a_i — среднее значение коэффициента поглощения звука по интенсивности; S — площадь отражающих поверхностей бассейна.

Если заглушение в бассейне хорошее, коэффициент поглощения близок к единице, интенсивность прямой волны намного больше интенсивности отраженных волн, и в этом случае в бассейне образуется поле сферических волн. В действительности вследствие неполного заглушения, звуковое поле несколько отличается от сферической волны. Методика проверки степени влияния отражений от поверхностей бассейна сводится к следующему: измеряются на различных частотах рабочего диапазона звуковые давления при изменении расстояния до источника. Изменение давления, обратно пропорциональное изменению расстояния от источника, будет свидетельствовать о наличии в бассейне поля сферической звуковой волны и отсутствии заметного влияния отраженных сигналов.

8.2. Описание экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 8.1.

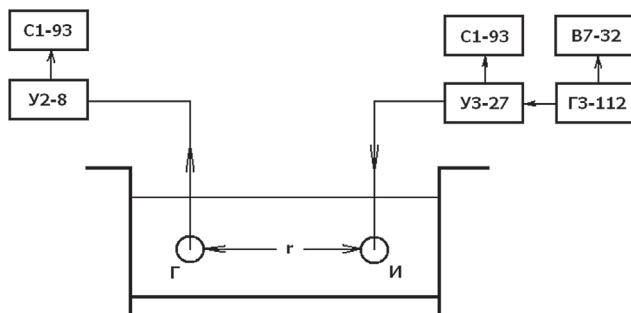


Рис. 8.1. Блок-схема экспериментальной установки.

8.3. Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторную работу по схеме, представленной на рис. 8.1. Проверить соблюдение поля бегущей волны в диапазоне частот 1,5–30 кГц.
2. Установить на генераторе сигнала частоту f , добиться превышения сигнала над помехой в 3 раза. Изменяя расстояние между излучателем и приемником, снять зависимость $P = F(r)$.
3. Построить график зависимости в логарифмическом масштабе, откладывая по оси ординат уровни звукового давления в децибелах, L по оси абсцисс — логарифм расстояния (рис. 8.2, а), $L = 20\log(P/P_0)$.
4. Построить график зависимости в линейном масштабе, откладывая по оси ординат величину I/P , а по оси абсцисс — расстояния (рис. 8.2, б). В обоих случаях изменению давления по сферическому закону будут соответствовать прямые линии.

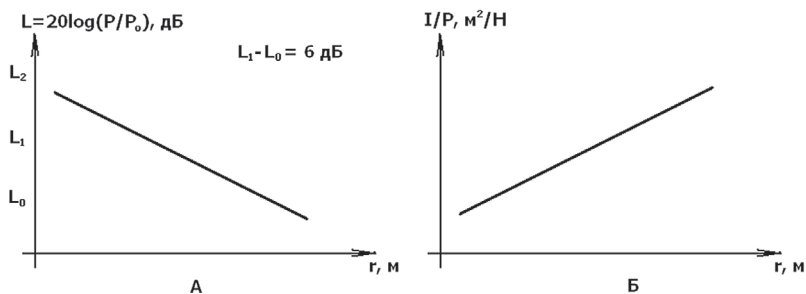


Рис. 8.2. Графики зависимости звукового давления относительно P/P_0 в дБ (А) и I/P в $\text{м}^2/\text{Н}$ (Б) от расстояния.

5. Проверить измерения для частот 1,5-30 кГц.
6. Оценить качество гидроакустического бассейна и определить допустимый рабочий диапазон частот.

8.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема лабораторной установки.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Краткие выводы.

8.5. Список литературы

1. *Евтютов А.П., Митько В.Б.* Инженерные расчеты в гидроакустике. — Л.: Судостроение, 1981.
2. *Урик Р.Д.* Основы гидроакустики. / Пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1978.
3. *Митько В.Б.* Прикладная гидрофизика. Учебное пособие. — СПб.: Изд. ГЭТУ, 1996.
4. Самописец уровня типа 2305. Описание и применение. Брюль и Кьер, 1969.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа №1 Исследование частотных параметров гидролокационной системы	5
Лабораторная работа №2 Исследование приповерхностного звукового канала (ППЗК)	13
Лабораторная работа №3 Исследование подводного звукового канала (ПЗК)	30
Лабораторная работа №4 Расчет геометрической дальности действия гидролокатора	38
Лабораторная работа №5 Градуировка электроакустических преобразователей	44
Лабораторная работа №6 Исследование пьезоэлектрического преобразователя	48
Лабораторная работа №7 Применение самописцев уровня напряжения при регистрации сигналов и помех	54
Лабораторная работа №8 Оценка качества гидроакустического бассейна и проводимых в нем измерений.	59

Учебное издание

*Арсений Валерьевич Митько,
Николай Николаевич Попов*

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
МОРСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

Редактор: *О.С. Крайнова*
Компьютерная верстка: *Ю.И. Климов*

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 17.05.13. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Newton.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 4,0. Тираж 300 экз. Зак. № 189.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано в ЦОП РГГМУ
