

Федеральное агентство морского и речного транспорта  
Федеральное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования



**ГОСУДАРСТВЕННАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ  
имени адмирала С.О. Макарова**

---

КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВОЖДЕНИЯ

**А.В. ЯЛОВЕНКО**

# **ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ**

Тексты лекций  
с элементами программированного обучения  
для студентов заочного обучения

Санкт-Петербург  
Издательство ГМА им. адм. С.О. Макарова  
2012

УДК 629.12.053.13

Я51

**Яловенко А.В.**

Я51 Гидроакустические навигационные приборы: тексты лекций с элементами программированного обучения для студентов заочного обучения. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2012. – 128 с.

ISBN 978-5-9509-0080-8

Соответствует программе дисциплины «Технические средства судовождения».

Рассмотрены основы прикладной теории гидроакустики, принцип действия эхолота, а также гидроакустических и индукционных систем измерения скорости судна. Особое внимание уделено точностным характеристикам рассматриваемых устройств.

Предназначено для студентов заочного обучения судоводительского, радиотехнического и арктического факультетов. Может также использоваться курсантами очного обучения.

Рекомендовано к изданию на заседании кафедры технических средств судовождения. Протокол № 8 от 17 апреля 2012 г.

*Рецензенты:*

Орехов А.В., канд. техн. наук, руковод. программ Морского учебно-тренажерного центра ГМА им. адм. С.О. Макарова;

Расулов Н.Г., канд. техн. наук, технический директор ООО «Навтехника».

ISBN 978-5-9509-0080-8

© ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2012

© Яловенко А.В., 2012

## Предисловие

Предлагаемое издание соответствует той части программы дисциплины «Технические средства судовождения», которая предусматривает изучение теории гидроакустических навигационных приборов и лагов. В нём рассматриваются основы прикладной теории гидроакустики, касающиеся основных закономерностей звукового поля, распространения звука в однородной среде, отражения и преломления звуковых волн, а также особенностей распространения звука в море. Полученные результаты используются для объяснения работы гидроакустических антенн и конкретных приборов, которые обеспечивают измерение глубины под килем и скорости судна.

Особенностью данного издания является то, что оно содержит элементы *программированного обучения*. Весь материал разбит на отдельные лекции, объем каждой из которых соответствует двум академическим часам учебного времени. Каждая лекция содержит контрольные вопросы, составленные по принципу программированного обучения, т.е. на каждый вопрос дается несколько ответов, среди которых один или несколько являются правильными. В конце приводятся краткие комментарии к ответам, которые позволяют студенту определить, правильно ли он ответил на контрольный вопрос. В случае как правильного, так и неверного ответа даны практические рекомендации, призванные оказать помощь студентам в процессе их самостоятельной работы с настоящим изданием.

## Введение

*Гидроакустика* (от греч. *hydor* – вода и *acusticos* – слуховой) – это наука о явлениях, происходящих в водной среде и связанных с излучением и приемом звуковых волн.

На современных судах транспортного, рыбопромыслового и научно-исследовательского флота наряду с гироскопическими, радиотехническими и другими навигационными приборами широко применяются гидроакустические навигационные приборы, к которым можно отнести следующие:

- эхолоты: навигационные, промерные, рыбопоисковые, глубоководные;
- гидролокаторы: переднего, кругового и бокового обзора;
- гидроакустические лаги: доплеровские и корреляционные;
- шумопеленгаторы;
- приборы подводной связи;
- гидроакустические навигационные системы.

На судах транспортного флота используются гидроакустические навигационные приборы первых трех групп.

Решение той или иной задачи с помощью гидроакустических навигационных приборов основано на использовании свойств звуковых волн, распространяющихся в море. В связи с этим будем рассматривать следующие два основных вопроса:

- что происходит в воде при распространении в ней звуковых волн;
- каким образом можно осуществить излучение и прием звуковых колебаний.

Наиболее полную картину распространения звука в жидкости дает волновая гидроакустика, основанная на законах гидромеханики. Однако при рассмотрении геометрической стороны вопроса можно применять методы геометрической (лучевой) акустики.

## 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

### 1.1. Физическая природа звука

Звук – это частный случай механических колебаний частиц материальной упругой среды. Источником звука в жидкости может быть, например, механическая колебательная система, помещенная в эту жидкость. На рис. 1.1 показано, что будет происходить в жидкости (при отсутствии затухания), если в ней возбудить звуковую волну. Частица *a*, к которой приложен импульс силы, совершает колебания относительно своего положения равновесия. В процессе колебания она сталкивается и передает часть энергии соседней частице *b*, которая также начинает колебаться. Таким же образом приходят в колебательное движение и остальные частицы (*в*, *г*, *д*, *е*). Причем каждая последующая из них начинает колебания с некоторым запаздыванием по времени по сравнению с предыдущей.

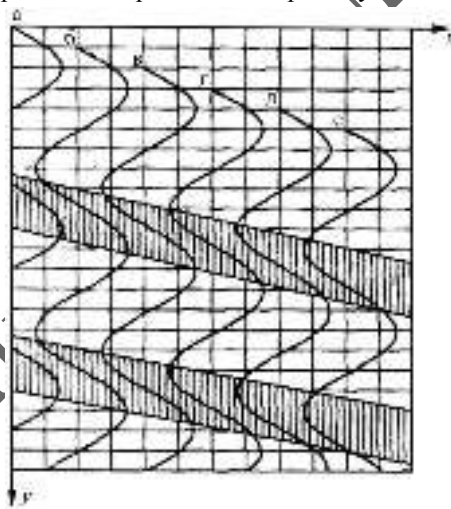


Рис. 1.1

На основании анализа рис. 1.1 можно сделать следующие выводы:

– возмущение, один раз возникнув, передается от одной частицы среды к другой, удаляясь от источника возмущения. Скорость распространения этого возмущения называется *скоростью звука*  $c$  и имеет размерность  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;

– частицы среды звуковой волной не переносятся. Они совершают колебательное движение относительно своего положения равновесия. Скорость, с которой колеблются частицы среды, называется *колебательной скоростью*  $v$  и имеет размерность  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;

– так как каждая последующая частица смещается из положения равновесия несколько позднее, чем предыдущая, то в среде образуются правильно чередующие зоны сгущений и разрежений частиц;

– в зоне сгущений (заштрихованная область) давление и плотность среды возрастают, а в зонах разрежений – уменьшаются.

Если действие возмущающей силы носит периодический характер, то и процесс распространения звука будет также периодическим не только во времени, но и в пространстве, т.е. будет носить волновой характер.

Пространство, в котором проявляются указанные явления, называется *звуковым полем*.

## 1.2. Вид и форма звуковой волны

Звуковые волны различаются по виду, форме и частоте. По виду звуковые волны бывают продольные, поперечные и сложные.

*Продольной* называется такая звуковая волна, в которой направление колебания частиц среды совпадает с направлением распространения волны. Продольные звуковые волны можно возбудить в любой упругой среде, в том числе и в жидкости.

*Поперечной* называется такая звуковая волна, в которой колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения звуковой волны. Такие волны можно возбудить только в твердых телах.

*Сложной* называется такая звуковая волна, в которой имеют место элементы продольных и поперечных волн. Ее можно возбудить также только в твердых телах.

Форма звуковой волны определяется ее *фронтом*, т.е. некоторой воображаемой поверхностью, соединяющей частицы среды, которые колеблются с одинаковой фазой.

Если фронт волны представляет собой правильную геометрическую фигуру, то такая звуковая волна называется *правильной*.

Если фронт волны имеет произвольную форму, то такая волна называется *неправильной*.

Линия, нормальная к фронту звуковой волны и совпадающая с направлением ее распространения, называется *звуковым лучом*.

Правильные звуковые волны могут иметь сферическую, цилиндрическую и плоскую форму.

*Сферическую волну* можно возбудить, если поместить в упругую среду пульсирующий шарик (рис. 1.2) В этом случае частицы среды, которые колеблются с одинаковой фазой, будут располагаться на сфере с радиусом  $r = ct$ .

Сферическую звуковую волну иногда называют *пространственной волной*.

*Цилиндрическую волну* можно получить, если поместить в упругую среду полый цилиндр, у которого пульсирует боковая поверхность (рис. 1.3). Полученная в этом случае волна будет распространяться в двух направлениях, поэтому её иногда называют *двухмерной*. Фронт такой волны имеет форму цилиндра.

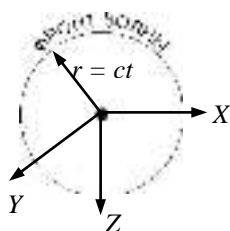


Рис. 1.2

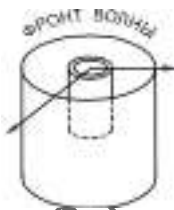


Рис. 1.3

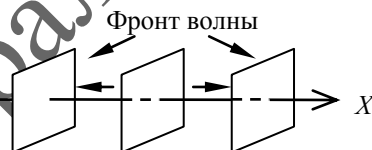


Рис. 1.4

*Плоские волны* можно получить, если поместить в упругую среду пластинку, которая совершает возвратно-поступательное движение.

Фронт такой волны (рис. 1.4) имеет форму плоскости, поэтому она имеет одноименное название. Плоская звуковая волна распространяется только вдоль оси  $X$ . При этом возникают две плоские волны, одна из которых распространяется в положительном направлении оси  $X$ , другая – в отрицательном.

По частоте звуковые волны делятся следующим образом:

- инфразвуковые  $f < 16$  Гц;
- звуковые  $f = 16$  Гц ... 16 кГц;
- ультразвуковые  $f > 16$  кГц.

### 1.3. Основные параметры звукового поля

Звуковое поле характеризуется параметрами, которые описывают всю совокупность явлений, происходящих в звуковом поле, а именно колебательное движение частиц среды, изменение давления, изменение плотности, перенос энергии. К этим параметрам относятся:

– смещение частиц от положения равновесия

$$u = f_1(x, y, z, t), \quad (1.1)$$

– колебательная скорость

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = f_2(x, y, z, t); \quad (1.2)$$

– изменение давления, которое принято оценивать с помощью звукового давления

$$p = p_1 - p_0 = f_3(x, y, z, t), \quad (1.3)$$

где  $p_1$  – мгновенное значение давления;  $p_0$  – статическое давление;

– изменение плотности жидкости, обычно характеризуемое уплотнением среды

$$\alpha = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} = f_4(x, y, z, t), \quad (1.4)$$

где  $\rho_1$  – мгновенное значение плотности,  $\rho_0$  – плотность среды при отсутствии звукового поля.

Такие параметры как колебательная скорость, звуковое давление и уплотнение среды могут быть связаны между собой, так называемым потенциалом скорости:

$$\varphi = f_5(x, y, z, t). \quad (1.5)$$

Под потенциалом скорости понимают некоторую вспомогательную переменную, градиент которой равен вектору колебательной скорости:

$$\vec{v} = \text{grad} \varphi, \quad (1.6)$$

или в составляющих по осям:

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Основной энергетической характеристикой звукового поля является интенсивность звука

$$I = f_6(x, y, z, t). \quad (1.7)$$



### Контрольные вопросы

1. В звуковом поле колебание частиц жидкости происходит со скоростью, называемой
  - скоростью звука (см. пояснение 141);
  - колебательной скоростью (см. пояснение 102).
2. В звуковом поле передача возмущения от одной частицы к другой происходит со скоростью, называемой
  - скоростью звука (см. пояснение 43);
  - колебательной скоростью (см. пояснение 54).
3. В жидкости можно возбудить следующие виды волн:
  - продольную звуковую волну (см. пояснение 71);
  - поперечную звуковую волну (см. пояснение 89);
  - сложную звуковую волну (см. пояснение 106).
4. Форма звуковой волны определяется:
  - её фронтом (см. пояснение 121);
  - её частотой (см. пояснение 135);
  - её амплитудой (см. пояснение 154).
5. Фронтом звуковой волны называется воображаемая поверхность, соединяющая точки среды, которые колеблются со следующими одинаковыми параметрами:
  - фазой (см. пояснение 168);
  - частотой (см. пояснение 50);
  - амплитудой (см. пояснение 93).

### Лекция 2

## 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В АКУСТИЧЕСКИ ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Для изучения явлений, происходящих в звуковом поле, необходимо получить уравнение распространения звуковой волны в жидкости (волновое уравнение).

При составлении волнового уравнения необходимо иметь в виду два общепринятых в гидромеханике допущения:

- жидкость будем считать акустически однородной;
- жидкость будем рассматривать как сплошную среду, не имеющую разрывов.

## 2.1. Составление волнового уравнения

Чтобы составить волновое уравнение, необходимо вначале получить систему частных уравнений, каждое из которых характеризует связь отдельных параметров звукового поля. Такими уравнениями являются уравнение неразрывности, уравнение колебательного движения, уравнение состояния жидкости. Рассмотрим их более подробно.

**Уравнение неразрывности.** Представляет собой особую математическую формулировку закона сохранения массы. Это уравнение характеризует такое понятие, как *сплошность среды*:

$$\partial \varphi / \partial t = -\nabla^2 \varphi, \quad (2.1)$$

где  $\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$ ;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Поскольку уравнение (2.1) содержит координаты  $x$ ,  $y$  и  $z$ , оно будет иметь различную форму записи для волны сферической, цилиндрической и плоской.

**Уравнение колебательного движения.** Это уравнение связывает такие параметры, как колебательная скорость и звуковое давление

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{p}{\rho_0}, \quad (2.2)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости;  $p$  – звуковое давление;  $\rho$  – плотность жидкости.

Уравнение (2.2) не содержит координат, поэтому оно имеет одинаковый вид для звуковой волны любой формы.

**Уравнение состояния жидкости.** Связывает силы, действующие в жидкости, с изменением плотности жидкости.

Имеет вид

$$p = (\varphi/K) + [(4\eta_1)/3] (\partial \varphi / \partial t), \quad (2.3)$$

где  $K$  – адиабатический коэффициент сжимаемости жидкости, имеющий размерность, обратную давлению,  $\text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^2$ ;  $\eta_1$  – коэффициент динамической (ньютоновой) вязкости, имеющий размерность  $\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Уравнение (2.3) справедливо для звуковой волны любой формы, распространяющейся в однородной вязкой жидкости.

Воспользуемся уравнениями (2.1) – (2.3) для составления волнового уравнения сферической звуковой волны, распространяющейся в вязкой

жидкости. Для этого возьмем частные производные по времени от выражений (2.1) – (2.3). Получим следующие выражения:

$$(\partial^2 \mathbf{x} / \partial t^2) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi); \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{K} (\partial \mathbf{x} / \partial t) + \frac{4}{3} \eta_1 (\partial^2 \mathbf{x} / \partial t^2). \quad (2.6)$$

Из выражений (2.5) и (2.6) имеем

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{1}{K\rho_0} (\partial \mathbf{x} / \partial t) - \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 (\partial^2 \mathbf{x} / \partial t^2). \quad (2.7)$$

Подставив в равенство (2.7) значения производных из выражений (2.1) и (2.4), получим

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{1}{K\rho_0} \nabla^2 \varphi + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi).$$

Обозначив  $\frac{1}{K\rho_0} = c^2$ , окончательно будем иметь

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \varphi + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi) - \quad (2.8)$$

волновое уравнение сферической звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости. О том, что волна сферическая, свидетельствует наличие всех трех координат ( $x, y, z$ ) под математическим символом  $\nabla$ , а о том, что жидкость вязкая, – наличие в уравнении (2.8) динамического коэффициента вязкости  $\eta_1$ .

## 2.2. Решение волнового уравнения плоской звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости

Для плоской звуковой волны имеем  $\varphi = f(x, t)$ . Поэтому из выражения (2.8) получим линейное дифференциальное уравнение в частных производных с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t \partial x^2}. \quad (2.9)$$

Решение уравнения (2.9) может быть представлено в виде суммы двух решений:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2,$$

где  $\varphi_1$  – потенциал скорости звуковой волны, распространяющейся в положительном направлении оси  $X$ ;

$\varphi_2$  – потенциал скорости звуковой волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси  $X$ .

Найдем сначала  $\varphi_1$ . Так как известно, что звуковая волна имеет гармонический характер, решение будем искать, используя *метод неопределенных коэффициентов*.

Учитывая периодичность потенциала не только во времени, но и в пространстве, для волны  $\varphi_1$  решение зададим в следующем виде:

$$\varphi_1 = \varphi_m e^{ik(ct+mx)}, \quad (2.10)$$

где  $\varphi_m$  – амплитуда потенциала скорости;  $k$  – волновое число,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $c$  – скорость звука;  $x$  – расстояние до источника звука;  $m$  – неизвестный коэффициент.

Для определения значения коэффициента  $m$  возьмем частные производные от равенства (2.10) по времени  $t$  и координате  $x$ :

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} = \varphi_m i^2 k^2 c^2 e^{ik(ct+mx)};$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} = \varphi_m i^2 k^2 m^2 e^{ik(ct+mx)};$$

$$\frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial x^2 \partial t} = \varphi_m i^3 k^3 m^2 c e^{ik(ct+mx)}$$

и подставим их в исходное уравнение (2.9):

$$\varphi_m i^2 k^2 c^2 e^{ik(ct+mx)} = \varphi_m i^2 k^2 m^2 c^2 e^{ik(ct+mx)} + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \varphi_m i^3 k^3 m^2 c e^{ik(ct+mx)}.$$

После сокращений получим

$$m^2 \left( 1 + \frac{4\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right) = 1$$

или

$$m^2 = \left( 1 + \frac{4\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right)^{-1}.$$

Отсюда

$$m = \pm \left( 1 + \frac{4\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.11)$$

Учитывая, что звуковая волна, распространяясь в вязкой жидкости, должна затухать, в выражении (2.11) перед скобкой выбираем знак «-», т.е.

$$m = - \left( 1 + \frac{4\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Анализ полученного равенства для морской воды и ультразвукового диапазона показывает, что

$$\frac{4\eta_1 k}{3\rho_0 c} \ll 1.$$

Это означает, что выражение в скобках в равенстве для  $m$  можно разложить в степенной ряд. Тогда, ограничиваясь двумя членами разложения, получим

$$m = - \left( 1 - \frac{2\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right) \quad (2.12)$$

Подставив полученное значение  $m$  из равенства (2.12) в заданное нами решение (2.10), получим

$$\varphi_1 = \varphi_m e^{ik \left[ \alpha \left( 1 - \frac{2\eta_1 k}{3\rho_0 c} i \right) x \right]} = \varphi_m e^{ik(ct-x)} e^{\frac{2\eta_1 k^2}{3\rho_0 c} i^2 x}.$$

Обозначая в полученном выражении

$$\frac{2\eta_1 k^2}{3\rho_0 c} = \alpha \text{ и учитывая, что } i^2 = -1,$$

получим

$$\varphi_1 = \varphi_m e^{-\alpha x} e^{ik(ct-x)}.$$

Применяя формулу Эйлера, имеем

$$\varphi_1 = \varphi_m e^{-\lambda x} [\cos k(ct-x) + i \sin k(ct-x)].$$

Учитывая, что физический смысл имеет только вещественная часть равенства, окончательно получим

$$\varphi_1 = \varphi_m e^{-\alpha x} \cos k(ct-x). \quad (2.13)$$

Аналогично для случая звуковой волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси  $X$ , имеем

$$\varphi_2 = \varphi_m e^{-\alpha x} \cos k(ct + x).$$

В реальных приборах используется только волна  $\varphi_1$ , поэтому для дальнейших исследований принимаем

$$\varphi = \varphi_m e^{-\alpha x} \cos k(ct - x). \quad (2.14)$$

Проанализируем коэффициент  $\alpha$ ,

$$\alpha = \frac{2\eta_1 k^2}{3\rho_0 c} = \frac{8\pi^2 \eta_1 c^2}{3\rho_0 c c^2} = \frac{8\pi^2 \eta_1}{3\rho_0 c^3} f^2.$$

Таким образом, для коэффициента затухания имеем следующее выражение:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 \eta_1}{3\rho_0 c^3} f^2. \quad (2.15)$$

Из полученного равенства видно, что коэффициент  $\alpha$  зависит не только от параметров среды, но и от квадрата частоты  $f$  излучаемого сигнала.

На основании выражения (2.14) можно сделать следующие выводы:

- амплитуда потенциала скорости плоской звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости, уменьшается по мере удаления от источника звука по экспоненциальному закону;
- потенциал скорости изменяется по закону косинуса с частотой  $\omega = ck$ ;
- по мере удаления от источника звука изменяется фаза звуковой волны  $kx$ .

### Контрольные вопросы

6. Уравнение неразрывности  $\partial \alpha / \partial t = -\nabla^2 \varphi$  характеризует следующую связь.

- между колебательным движением частиц и изменением плотности среды (см. пояснение 142);
- между колебательным движением частиц и изменением давления (см. пояснение 27);
- между изменением плотности среды и изменением давления (см. пояснение 44).

## 7. Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \varphi + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi)$$

описывает процессы, происходящие

- в сферической звуковой волне (см. пояснение 55);
- в цилиндрической звуковой волне (см. пояснение 152);
- в плоской звуковой волне (см. пояснение 90).

8. Уравнение состояния  $P = (\alpha/K) + [(4\eta_1)/3] (\partial\alpha/\partial t)$  характеризует связь

- между колебательным движением частиц и изменением плотности среды (см. пояснение 107);
- между колебательным движением частиц и изменением давления (см. пояснение 122);
- между изменением плотности среды и изменением давления (см. пояснение 136).

9. Потенциал скорости  $\varphi$  плоской звуковой волны изменяется следующим образом:

- по закону синуса (см. пояснение 155);
- по закону косинуса (см. пояснение 72);
- по экспоненциальному закону (см. пояснение 167).

## Лекция 3

### 2.3. Анализ звукового поля

Вспользуемся решением (2.14) для определения законов изменения основных параметров звукового поля.

Закон изменения потенциала скорости имеет вид

$$\varphi = \varphi_m e^{-\alpha x} \cos k(ct - x). \quad (2.16)$$

Из уравнения колебательного движения (2.2) имеем

$$p = -\rho_0 - \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (2.17)$$

Определив  $\partial\varphi/\partial t$  из равенства (2.16), получим

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\varphi_m k c e^{-\alpha x} \sin k(ct - x). \quad (2.18)$$

Подставляя уравнение (2.18) в (2.17), имеем

$$p = \varphi_m k c \rho_0 e^{-\alpha x} \sin k(ct - x),$$

или обозначая  $\varphi_m k c \rho_0 = p_m$ , получим уравнение закона изменения звукового давления плоской звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости:

$$p = p_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x). \quad (2.19)$$

О том, что это плоская волна, свидетельствует присутствие в уравнении (2.19) только одной координаты  $x$ , о вязкости жидкости – присутствие в формуле (2.19) коэффициента затухания  $\alpha$ , который зависит от коэффициента динамической вязкости жидкости  $\eta$ .

Из определения потенциала скорости имеем  $v = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ .

Определяя значение  $\partial \varphi / \partial x$  из выражения (2.16), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= -\varphi_m \lambda e^{-\alpha x} \cos k(ct - x) + \varphi_m e^{-\alpha x} k \sin k(ct - x) = \\ &= \varphi_m k e^{-\alpha x} \left[ \sin k(ct - x) - \frac{\alpha}{k} \cos k(ct - x) \right] \end{aligned}$$

Обозначим  $\frac{\alpha}{k} = \operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \psi}{\cos \psi}$ . Тогда

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\varphi_m k}{\cos \psi} e^{-\alpha x} [\sin k(ct - x) \cos \psi - \cos k(ct - x) \sin \psi]$$

или

$$v = v'_m e^{-\alpha x} \sin [k(ct - x) - \psi], \quad (2.20)$$

где  $v'_m = \frac{\varphi_m k}{\cos \psi}$ .

Из выражения (2.20) видно, что в общем случае колебательная скорость по отношению к звуковому давлению изменяется с некоторым постоянным сдвигом по фазе. Однако анализ показывает, что при распространении ультразвуковой волны в вязкой жидкости, к которой относится морская вода, сдвиг по фазе  $\psi \approx 0$ . Это означает, что равенство (2.20) принимает вид

$$v = v_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x), \quad (2.21)$$

где  $v_m = \varphi_m k$ .

Анализируя выражения (2.19) и (2.21), можно отметить следующее:

– звуковое давление и колебательная скорость изменяются синфазно;



– звуковое давление и колебательная скорость изменяются по закону синуса с частотой  $\omega = ck$ ;

– по мере удаления от источника звука амплитуда и  $p$ , и  $v$  уменьшается по экспоненциальному закону, изменяется также фаза  $kx$ .

Определим отношение звукового давления к колебательной скорости.

$$\text{Получим } z = \frac{p}{v} = \frac{\varphi_m k \rho_0 c e^{-\alpha x} \sin k(ct - x)}{\varphi_m k e^{-\alpha x} \sin k(ct - x)} = \rho_0 c \approx \rho c.$$

Произведение плотности среды на скорость распространения звука в ней называется *удельным акустическим сопротивлением среды*.

#### 2.4. Интенсивность звука

Интенсивность звука является основной энергетической характеристикой звукового поля. Интенсивностью звука  $I$  называется количество энергии, которое переносит звуковая волна через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению ее распространения, за единицу времени.

Значение интенсивности звука можно определить следующим образом. Возьмем звуковую волну произвольной формы. Все точки фронта волны, имеющего площадь  $Q$ , колеблется с одинаковой фазой и за время  $dt$  получают смещение

$$du = v dt,$$

которому будут противодействовать силы внутреннего взаимодействия

$$F = Qp.$$

Для преодоления этих сил необходимо затратить работу

$$dA = Qp du = Qpv dt.$$

Выражение для работы, совершенной за период колебаний  $T$ , имеет вид

$$A = Q \int_0^T p v dt.$$

Чтобы совершить эту работу, потребуется следующая мощность:

$$N = \frac{A}{T} = \frac{Q}{T} \int_0^T p v dt.$$

**Интенсивность** – это поток энергии за единицу времени через единицу площади или, другими словами, это мощность, приходящаяся на единицу площади, т.е.

$$I = \frac{N}{Q},$$

или

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt. \quad (2.22)$$

Полученное выражение называется *формулой Умова*. Оно является универсальным и пригодно для определения интенсивности любой волны, распространяющейся в любой среде.

Определим интенсивность плоской звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости. Для этого подставим в равенство (2.22) значения  $p$  и  $v$  из выражений (2.19) и (2.21). Получим

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x) v_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x) dt = \frac{p_m v_m}{T} e^{-2\alpha x} \int_0^T \sin^2 k(ct - x) dt,$$

так как  $\int_0^T \sin^2 k(ct - x) dt = \frac{T}{2}$ , то  $I = \frac{p_m v_m}{2} e^{-2\alpha x}$ .

Обозначим

$$\frac{p_m v_m}{2} = \frac{1}{2} \rho c v_m^2 = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c} = I_0; \quad 2\alpha = \beta_1.$$

Тогда получим

$$I = I_0 e^{-\beta_1 x}. \quad (2.23)$$

Данное выражение называется *формулой Стокса*, которая позволяет определить интенсивность плоской звуковой волны (о том, что волна плоская говорит наличие в формуле (2.23) только одной координаты  $X$ ), распространяющейся в вязкой жидкости (о том, что жидкость вязкая свидетельствует наличие в этой формуле коэффициента поглощения  $\beta_1$ , который зависит от коэффициента динамической вязкости  $\eta_1$ ).

## 2.5. Дальность распространения звуковых волн

Как видно из выражения (2.23), интенсивность плоской волны убывает по экспоненциальному закону и зависит от линейной частоты колебаний  $f$ . С увеличением  $f$  поглощение усиливается. Экспериментальным путем было установлено, что в ряде случаев формула (2.23) дает сильно завышенные значения. При этом оказалось, что действительные значения коэффициента поглощения  $\beta_1$  в некоторых жидкостях во много раз превышают вычисленные по приведенным ранее формулам. К этим жидкостям относятся и морская вода.

Удовлетворительное объяснение аномального поглощения звука в мало-вязких жидкостях типа морской воды дали в 40-е гг. XX в. советские академики Л.И. Мандельштам и Л.А. Леонтович. Они показали, что при энергетическом анализе звукового поля жидкость уже нельзя считать сплошной средой и нужно учитывать ее молекулярные особенности. Распространение звука в жидкости в виде попеременного сжатия и разряжения среды, на самом деле, сопровождается дополнительными явлениями, происходящими на молекулярном уровне. На поддержание этих процессов затрачивается дополнительная энергия, которую не учитывает изложенная ранее классическая теория.

Механизм молекулярного процесса зависит от физических свойств жидкости. В морской воде, например, при наличии звукового поля происходит непрерывная диссоциация молекул сернокислого магния  $MgSO_4$ , являющегося основной компонентой, определяющей соленость. Это явление называют *молекулярным поглощением звука*. Для того, чтобы учесть молекулярное поглощение, был введен второй коэффициент поглощения  $\beta_2$ , с учетом которого формула Стокса (2.23) приобретает вид

$$I = I_0 e^{-\beta x}, \quad (2.24)$$

где  $\beta = \beta_1 + \beta_2$ .

Многолетние измерения в естественных морских условиях показали, что в диапазоне частот 7,5 ... 60 кГц довольно точной является следующая эмпирическая формула для суммарного коэффициента  $\beta$ , дБ·км<sup>-1</sup> (рис. 2.1):

$$\beta = 0,036 f^{3/2}. \quad (2.25)$$

Важно отметить, что здесь учитывается не только вязкость, но и дополнительные потери, обусловленные неоднородностью морской воды.

Экспериментальные данные позволили также аппроксимировать формулу (2.24) выражением

$$I = I_0 e^{-\beta x} \approx I_0 10^{-0,1\beta x}. \quad (2.26)$$

При этом ошибка не превышает  $\pm 10\%$ , если  $x < 150$  миль. С помощью формул (2.24) или (2.26) можно вычислить дальность распространения звука в безграничном море.

Определим дальность распространения плоской звуковой волны в вязкой жидкости. Для этого из выражения (2.24) запишем

$$\frac{I_{\min}}{I_0} = e^{-\beta x_{\max}},$$

отсюда 
$$\ln\left(\frac{I_{\min}}{I_0}\right) = -\beta x_{\max}.$$

Тогда 
$$x_{\max} = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_{\min}}{I_0}\right). \quad (2.27)$$

Здесь  $x_{\max}$  – дальность распространения плоской звуковой волны;  $I_{\min}$  – интенсивность звука, которая еще способна возбудить принимающую антенну (чувствительность приемника);  $I_0$  – интенсивность звука, излученная антенной;  $\beta$  – коэффициент поглощения звука.

Из выражения (2.27) видно, что коэффициент  $\beta$  должен иметь размерность Нп/км (непер/км).

Учитывая, что 1 Нп = 8,68 дБ или 1 дБ = 0,115 Нп, коэффициент  $\beta$ , Нп·км<sup>-1</sup>, в выражении (2.25) примет вид

$$\beta = 0,00414 f^{3/2}. \quad (2.27)$$

Следует отметить, что в выражениях (2.25) и (2.27) частоту  $f$  необходимо подставлять в кГц.

В сферической волне потенциал скорости  $\varphi$  является функцией всех трех координат, т.е.  $\varphi = f(x, y, z, t)$ , и поэтому ее волновое уравнение имеет вид равенства (2.8).

Решение этого уравнения в сферических координатах можно записать следующим образом:

$$\varphi = \frac{\varphi_0 r}{r} e^{-\beta r} \cos k(ct - r). \quad (2.28)$$

Сравнивая формулу (2.28) с потенциалом скорости плоской волны (2.14), видим, что амплитуда сферической волны убывает дополнительно еще пропорционально расстоянию  $r$ , причем это убывание не зависит от вязкости. Отмеченная особенность легко объясняется непрерывным расширением фронта волны (сферы) по мере увеличения расстояния (радиуса)  $r$ . Ранее было показано, что интенсивность плоской звуковой волны пропорциональна квадрату  $p$ ,  $v$  или  $\varphi$ . Благодаря этому интенсивность сферической волны

$$I = \frac{I_0}{r^2} e^{-\beta r}. \quad (2.29)$$

### Контрольные вопросы

11. В звуковом поле в общем случае звуковое давление и колебательная скорость изменяются следующим образом:

- синфазно (см. пояснение 146);
- с небольшим сдвигом по фазе (см. пояснение 15);
- в противофазе (см. пояснение 45);
- со сдвигом по фазе на  $\pi/2$  (см. пояснение 56).

12. Формула Умова позволяет определить интенсивность

- плоской звуковой волны (см. пояснение 73);
- сферической звуковой волны (см. пояснение 91);
- цилиндрической звуковой волны (см. пояснение 108);
- звуковой волны любой формы (см. пояснение 123).

13. В выражении для закона изменения звукового давления  $p = p_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x)$  фазой сигнала являются:

- величина  $\alpha x$  (см. пояснение 137);
- величина  $kx$  (см. пояснение 156);
- величина  $kx$  (см. пояснение 166).

14. Используя закон изменения звукового давления  $p = p_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x)$ , определите, как изменяется амплитуда звукового давления по мере удаления от источника звука:

- остается неизменной (см. пояснение 151);
- уменьшается по экспоненте (см. пояснение 133);
- увеличивается по экспоненте (см. пояснение 120).

15. Для расчета коэффициента поглощения звука применяется эмпирическая формула  $\beta = 0,036 f^{3/2}$ .

Рассчитанный по этой формуле коэффициент  $\beta$  имеет размерность:

- дБ·км<sup>-1</sup> (см. пояснение 105);
- дБ·м<sup>-1</sup> (см. пояснение 88);
- Нп·км<sup>-1</sup> (см. пояснение 59).

#### Лекция 4

### 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В АКУСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Большинство гидроакустических навигационных приборов (эхолоты, гидролокаторы, гидроакустические лаги) используют эхо-метод. Поэтому явление отражения и преломления звуковых волн имеет важное практическое значение.

### 3.1. Физическая сущность отражения и преломления звуковых волн

В том случае, когда в процессе распространения звуковая волна встречает на своем пути преграду (например, морское дно), размеры которой значительно больше длины волны, наблюдается явление отражения и преломления звуковых волн. Физика данного явления легко объясняется принципом Гюйгенса, который гласит, что в любой момент времени частицы, составляющие фронт звуковой волны, являются элементарными источниками сферических волн. Огибающая этих волн определяет новое положение фронта звуковой волны.

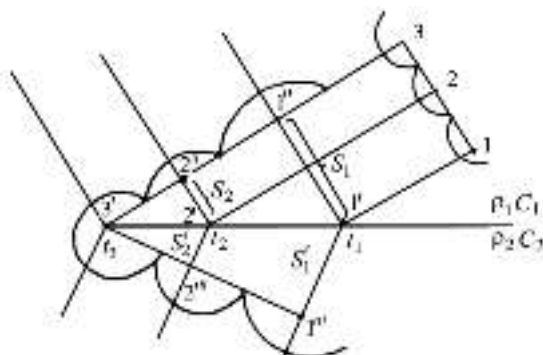


Рис. 3.1

Предположим, что мы имеем две среды с акустическими сопротивлениями  $\rho_1 c_1$ , и  $\rho_2 c_2$  (рис. 3.1). Пусть в направлении границы раздела этих сред падает плоская звуковая волна (частицы 1, 2, 3). Элементарная волна частицы 1, перемещаясь по нормали к фронту волны, в некоторый момент времени  $t_1$  достигнет границы раздела в точке  $I'$ . Согласно *принципу Гюйгенса*, частица  $I'$  станет источником вторичной волны. Так как эта частица лежит на границе раздела сред, ее можно отнести и к первой и ко второй средам. Следовательно, элементарные волны возникают в обеих средах. В некоторый момент времени  $t_2$  аналогичное явление произойдет с элементарной волной, излучаемой точкой 2, а в момент времени  $t_3$  – с волной точки 3. К моменту времени  $t_3$  элементарная волна, излучаемая частицей 1, успеет распространиться на расстояния  $S_1 = c_1(t_3 - t_1)$  и  $S_1' = c_2(t_3 - t_2)$  в первой и во второй среде соответственно. К этому же моменту времени элементарная волна, излучаемая частицей 2', распространится на расстояния

$S_2 = C_1(t_3 - t_2)$  и  $S_2' = C_2(t_3 - t_2)$ . Соединив точки  $3'$ ,  $2''$  и  $1''$ , построим фронт отраженной волны. Аналогично, соединив точки  $3'$ ,  $2'''$ ,  $1'''$ , определим положение фронта преломленной волны.

В конечном итоге, как видно из рис. 3.1, падающая звуковая волна, придя на границу раздела, как бы расщепляется на две волны, одна из которых распространяется в первой среде и называется *отраженной*, а другая – во второй среде и называется *преломленной*.

В дальнейшем параметры всех трех волн будут иметь соответствующие индексы:

- $i$  – для падающей звуковой волны;
- $r$  – для отраженной звуковой волны;
- $t$  – для преломленной звуковой волны.

### 3.2. Геометрические соотношения в падающей, отраженной и преломленной волнах

Предположим, что мы имеем две однородные среды, которые характеризуются акустическими сопротивлениями  $\rho_1 c_1$  и  $\rho_2 c_2$ . Заменяя звуковую волну звуковым лучом, из рис. 3.2 будем иметь  $\theta_i$  – угол падения;  $\theta_r$  – угол отражения;  $\theta_t$  – угол преломления.

Представим себе плоскую звуковую волну, падающую на границу раздела двух сред (рис. 3.3). Выделим элемент фронта волны  $S$ . К моменту времени  $t_2$  элемент фронта волны  $S$  окажется на границе раздела сред в точке  $O$ .

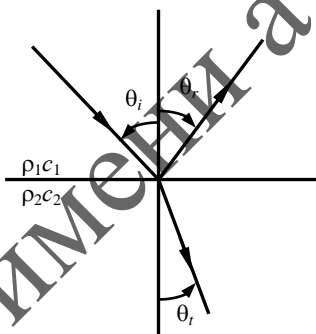


Рис. 3.2

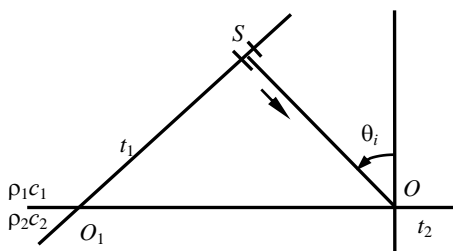


Рис. 3.3

Проведем нормаль к границе раздела и обозначим угол падения  $\theta_i$ . Вычислим время, за которое элемент  $S$  достигнет точки  $O$ :

$$t = t_2 - t_1 = \frac{SO}{c_1}. \quad (3.1)$$

Точка  $O_1$  является следом фронта волны на границе раздела двух сред. Так как фронт падающей волны непрерывно движется со скоростью  $c_1$  в направлении, характеризуемом углом падения  $\theta_i$ , точка  $O_1$  будет перемещаться по границе раздела в направлении точки  $O$ . Она достигнет точки  $O$  в тот же момент времени  $t_2$ , что и элемент  $S$ . Следовательно, время перемещения точки  $O_1$  по границе раздела

$$t = t_2 - t_1 = \frac{OO_1}{c^*},$$

где  $c^*$  – скорость движения следа фронта волны вдоль границы раздела сред.

$$\text{Так как } OO_1 = \frac{SO}{\sin \theta_i}, \quad t = \frac{SO}{c^* \sin \theta_i}. \quad (3.2)$$

Тогда, приравнявая выражения (3.1) и (3.2), будем иметь

$$\frac{SO}{c_1} = \frac{SO}{c^* \sin \theta_i},$$

откуда

$$c^* = \frac{c_1}{\sin \theta_i}. \quad (3.3)$$

Точка  $O$  является общей для падающей, отраженной и преломленной волн, поэтому по аналогии с выражением (3.3) можно записать:

$$c^* = \frac{c_1}{\sin \theta_r}; \quad (3.4)$$

$$c^* = \frac{c_2}{\sin \theta_t}, \quad (3.5)$$

где  $c^*$  – постоянная Снеллиуса.

Из выражений (3.3) и (3.4) имеем

$$\theta_i = \theta_r. \quad (3.6)$$

Равенство (3.6) называется *законом отражения*, который формулируется следующим образом: *угол падения равен углу отражения*.

Из выражений (3.3) и (3.5) имеем

$$\frac{c_1}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{\sin \theta_t},$$



откуда 
$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3.7)$$

Равенство (3.7) называется *законом преломления*, который формулируется следующим образом: *синус угла отражения так относится к синусу угла преломления, как скорость звука в первой среде к скорости звука во второй.*

Как видно из полученных выражений (3.6) и (3.7), законы отражения и преломления звуковых волн тождественны аналогичным законам геометрической оптики и, следовательно, без каких бы то ни было дополнительных доказательств можно ввести следующие понятия:

- полное внутреннее отражение звуковой волны;
- полное проникновение звуковой волны;
- критический угол падения и т.д.

В частности, критический угол падения получим следующим образом. На основании (3.7) имеем

$$\sin \theta_i = \frac{c_1}{c_2} \sin \theta_t.$$

Пусть  $c_2 > c_1$ .

Угол падения, при котором  $\theta_t = 90^\circ$ , называется *критическим углом падения*. При углах падения больше критического наблюдается полное внутреннее отражение. Следовательно,

$$\sin \theta_{\text{кр}} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3.8)$$

Соответственно, если  $\theta_i > \theta_{\text{кр}}$ , то наступает полное внутреннее отражение. Явление полного проникновения падающей волны во вторую среду возможно, например, при выполнении условия  $c_1 = c_2$ .

Если на пути распространения звукового луча имеется ряд параллельных слоев жидкости (рис. 3.4), обладающих различными акустическими сопротивлениями, то будет справедливо равенство

$$\frac{c_1}{\sin \theta_{i1}} = \frac{c_2}{\sin \theta_{i2}} = \frac{c_3}{\sin \theta_{i3}} = c^* = \text{const}. \quad (3.9)$$

### 3.3. Энергетические соотношения в падающей, отраженной и преломленной волне

Под энергетическими соотношениями подразумевают коэффициенты отражения и преломления звука. Коэффициентом отражения  $A$  называется величина, которая показывает, какая часть звуковой энергии отражается от границы раздела сред по сравнению с энергией падающей звуковой волны:

$$A = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1/2 \cdot \rho_1 c_1 v_r^2}{1/2 \cdot \rho_1 c_1 v_i^2} = \left( \frac{v_r}{v_i} \right)^2. \quad (3.10)$$

Коэффициентом преломления  $B$  называется величина, которая показывает, какая часть звуковой энергии перейдет в другую среду по сравнению с энергией падающей звуковой волны:

$$B = \frac{I_t}{I_i} = \frac{1/2 \cdot \rho_2 c_2 v_t^2}{1/2 \cdot \rho_1 c_1 v_i^2} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \left( \frac{v_t}{v_i} \right)^2. \quad (3.11)$$

Для того, чтобы можно было использовать равенства (3.10) и (3.11) для практических расчетов, выразим коэффициенты  $A$  и  $B$  через известные величины: акустическое сопротивление сред и углы падения и преломления. Пользуясь рис. 3.2, составим следующие граничные условия, учитывая, что точка  $O$  является общей для обеих сред:

$$p_i + p_r = p_t; \quad (3.12)$$

$$v_i \cos \theta_i - v_r \cos \theta_i = v_t \cos \theta_t. \quad (3.13)$$

Исходя из того, что  $p = \rho v c$ , выражение (3.12) можно записать в виде

$$\rho_1 c_1 v_i + \rho_1 c_1 v_r = \rho_2 c_2 v_t. \quad (3.14)$$

Определив из выражения (3.14) значение для  $v_t$ , получим

$$v_t = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} v_i + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} v_r.$$

Подставив это значение  $v_t$  в равенство (3.13), имеем

$$v_i \cos \theta_i - v_r \cos \theta_i = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} v_i \cos \theta_i + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} v_r \cos \theta_t,$$

или

$$v_i \left[ \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2} \right] = v_r \left[ \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2} \right].$$

Отсюда 
$$\frac{v_r}{v_1} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} \quad (3.15)$$

Подставив значения из выражения (3.15) в равенство (3.10), будем иметь

$$A = \left( \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} \right)^2. \quad (3.16)$$

Полученное выражение служит для расчета коэффициента отражения в общем случае, когда звуковая энергия падает на границу раздела сред под любым углом.

Для определения коэффициента преломления  $B$  из выражения (3.14) найдем  $v_r$ ,

$$v_r = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} v_t - v_i.$$

Подставив полученное значение  $v_r$  в равенство (3.13), запишем

$$v_i \cos \theta_i - v_t \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \cos \theta_i + v_t \cos \theta_i = v_t \cos \theta_t$$

или 
$$2v_i \cos \theta_i = v_t \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_1 c_1}.$$

Отсюда 
$$\frac{v_t}{v_i} = \frac{2\rho_1 c_1 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}. \quad (3.17)$$

Подставляя равенство (3.17) в выражение (3.11), окончательно для коэффициента преломления  $B$  будем иметь:

$$B = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos^2 \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}. \quad (3.18)$$

Полученное выражение служит для расчета коэффициента преломления в случае, когда звуковая энергия падает на границу раздела сред под любым углом.

Определим выражения для расчета коэффициентов  $A$  и  $B$  для эхолота, когда

$$\theta_i = \theta_r = \theta_t = 0.$$

Обозначив  $\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 = q$ , из равенств (3.16) и (3.17) имеем:

$$A = \frac{(1-q)^2}{(1+q)^2}; \quad (3.19)$$

$$B = \frac{4q}{(1+q)^2}. \quad (3.20)$$

Проанализируем с помощью равенств (3.19) и (3.20) различные варианты соотношений акустических сопротивлений сред:

$$\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1; \quad q < 1; \quad A \neq 0; \quad B \neq 0;$$

$$\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1; \quad q \ll 1; \quad A \approx 1; \quad B \approx 0;$$

$$\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1; \quad q > 1; \quad A \neq 0; \quad B \neq 0;$$

$$\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1; \quad q \gg 1; \quad A \approx 1; \quad B \approx 0;$$

$$\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1; \quad q = 1; \quad A = 0; \quad B = 1.$$

На основе результатов проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- если акустические сопротивления сред отличаются друг от друга незначительно, то независимо от того, какая из сред имеет большее акустическое сопротивление, на границе раздела сред будет иметь место и отражение, и преломление звуковых волн;

- если акустические сопротивления сред отличаются значительно друг от друга, то имеем дело с жесткой границей раздела сред. В этом случае будет наблюдаться полное отражение энергии от границы раздела сред. При этом не имеет значения, какая из сред имеет большее акустическое сопротивление;

- чем больше будут отличаться друг от друга акустические сопротивления сред, тем больше звуковой энергии будет отражаться от границы раздела сред;

- если обе среды имеют одинаковые акустические сопротивления, то в этом случае нет никакой границы раздела сред и не будет никакого отражения. Звуковая волна будет продолжать распространяться в том же направлении.

Поверхность морского дна не является идеально гладкой (рис. 3.4). Неровности морского дна могут вызвать при определенных условиях значительное рассеивание звуковой энергии. В том случае, когда их размеры меньше длины падающей волны  $\delta < \lambda$ , отражение будет происходить как от идеально гладкой (зеркальной) поверхности. Если  $\delta > \lambda$ , то часть энергии падающей волны будет рассеиваться в разных направлениях.

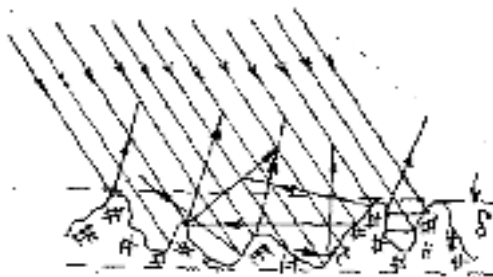


Рис. 3.4

При длине волн, равной нескольким сантиметрам, падающая на дно звуковая энергия будет рассеиваться во всех направлениях. Такое отражение называется *диффузным*.

Наряду с ослаблением интенсивности звуковых лучей за счет диффузного рассеивания, неровность морского дна вызывает значительные искажения звукового поля вблизи приемника звука из-за взаимодействия отдельных звуковых лучей, многократно отраженных и пришедших к приемнику в одно время.

В таблице приведены характеристики отражательной способности морских грунтов.

Грунт	A, %	Грунт	A, %
Гранит	70 ... 80	Глина	20 ... 30
Крупный камень	60 ... 70	Лед	10 ... 15
Песок	50 ... 60	Ил	5 ... 10
Супесок	40 ... 50	Жидкий ил	0 ... 5

При распространении звука в море важную роль играет поверхность воды. Поскольку источники и приемники звука не обладают совершенной направленностью, в приемник всегда может прийти звук, отраженный от поверхности воды.

Интенсивность отраженного звука будет зависеть от состояния поверхности моря. Волнение, рябь и другие явления будут иметь при этом существенное значение. В общем случае волнение моря носит неправильный характер, причем основные параметры морской волны быстро меняются. Эти обстоятельства затрудняют точный математический анализ отражения звука от поверхности моря. Однако для определенного промежутка времени можно считать, что отражение от поверхности моря будет в общих чертах сходно с

отражением от неровного дна. В связи с тем, что поверхность воды может принимать самую разнообразную форму, звуковая энергия будет фокусироваться в одних случаях и рассеиваться в других.

### 3.4. Фазовые соотношения в падающей и отраженной волнах

Зададим падающую и отраженную волны колебательными скоростями, предполагая, что отраженная волна имеет некоторый сдвиг по фазе  $\psi$ :

$$v_i = v_m \sin k(ct - x); \quad (3.20)$$

$$v_r = v_m \sin[k(ct - x) + \psi]. \quad (3.21)$$

Из выражения (3.19) с учетом равенства (3.10) имеем

$$\frac{v_r}{v_i} = \frac{(1-q)}{(1+q)}, \quad (3.22)$$

где  $q = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$ .

Рассмотрим два крайних случая соотношений акустических сопротивлений сред.

1)  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ . В этом случае  $q \ll 1$  и из выражения (3.22) имеем, что  $v_i = v_r$ , т.е.

$$v_i = v_m \sin k(ct - x) = v_m \sin[k(ct - x) + \psi].$$

Полученное равенство справедливо только в том случае, когда  $\psi = 0$ .

Таким образом, если акустическое сопротивление первой среды намного меньше, чем второй, то падающая и отраженная волны имеют одинаковые фазы.

2)  $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$ . В этом случае  $q \gg 1$  и из выражения (3.22) имеем, что  $v_i = -v_r$ , т.е.

$$v_i = v_m \sin k(ct - x) = -v_m \sin[k(ct - x) + \psi].$$

Полученное равенство справедливо лишь в том случае, когда  $\psi = 180^\circ$ .

Следовательно, если акустическое сопротивление первой среды намного больше, чем второй, то падающая и отраженная волны находятся в противофазе.

#### Контрольные вопросы

16. Среда называется акустически однородной в следующем случае:
- если  $\rho c = \text{const}$  (см. пояснение 3);
  - если  $\rho c \neq \text{const}$  (см. пояснение 16).

17. Закон отражения звука имеет следующий вид:

–  $\theta_i = \theta_t$  (см. пояснение 28);

–  $\theta_i = \theta_r$  (см. пояснение 69);

–  $\theta_r = \theta_t$  (см. пояснение 57).

18. Величина, которая показывает, какая часть энергии падающей звуковой волны при достижении границы раздела сред останется в первой среде, называется

– коэффициентом отражения (см. пояснение 74);

– коэффициентом преломления (см. пояснение 92).

19. Если справедливо неравенство  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ , то отраженная звуковая волна имеет фазу:

– одинаковую с падающей (см. пояснение 12);

– противоположную падающей (см. пояснение 124).

20. Если справедливо неравенство  $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$ , то отраженная звуковая волна имеет фазу:

– одинаковую с падающей (см. пояснение 138);

– противоположную падающей (см. пояснение 157).

#### Лекция 5

### 4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Звуковые волны обладают свойством *интерференции*. Другими словами, они могут складываться. Причем в одних точках звукового поля за счет интерференции колебания могут усиливаться, а в других – совершенно исчезнуть. Последним обстоятельством можно объяснить образование зон звуковой тени, когда без каких-либо особых причин показания прибора исчезают. Поскольку мы имеем дело с малыми колебаниями, будем подходить к исследованию интерференции звуковых волн с точки зрения таких колебаний. Это сильно упрощает дело, так как с точки зрения математики вопрос сводится к алгебраическим действиям с тригонометрическими функциями.

Интерферирующие колебания могут иметь различные амплитуды, фазы и частоты. Однако особый интерес представляет случай, когда складываются колебания, образованные одним и тем же источником, но пришедшие в данную точку звукового поля различными путями. В этом случае колебания имеют равные амплитуды и частоты, но отличаются друг от друга фазами.

#### 4.1. Стоячая звуковая волна

Рассмотрим частый случай интерференции звуковых волн, в результате которой возникает, так называемая *стоячая волна*. Стоячие волны образуются в результате сложения падающей и отраженной волн, если отражающая поверхность расположена нормально к направлению распространения звука и существует жесткая граница раздела сред, т.е.  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$  или  $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$ .

Зададим падающую и отраженную волны колебательными скоростями и звуковыми давлениями. При этом начало системы координат поместим на границу раздела сред.

$$\text{Тогда} \quad v_i = v_m \sin k(ct - x); \quad (4.1)$$

$$v_r = v_m \sin k(ct + x); \quad (4.2)$$

$$p_i = p_m \sin k(ct - x); \quad (4.3)$$

$$p_r = p_m \sin k(ct + x). \quad (4.4)$$

Рассмотрим два крайних случая соотношений акустических сопротивлений сред.

1.  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ . В этом случае суммарная колебательная скорость будет

$$v_1 = v_i - v_r = v_m [\sin k(ct - x) - \sin k(ct + x)] = 2v_m \sin(-kx) \cos kct$$

$$\text{или} \quad v_1 = a_1 \cos kct, \quad (4.5)$$

$$\text{где} \quad a_1 = -2v_m \sin kx. \quad (4.6)$$

Суммарное звуковое давление

$$p_1 = p_i + p_r = p_m [\sin k(ct - x) + \sin k(ct + x)] = 2p_m \cos(-kx) \sin kct$$

$$\text{или} \quad p_1 = b_1 \sin kct, \quad (4.7)$$

$$\text{где} \quad b_1 = 2p_m \cos kx. \quad (4.8)$$

Полученные выражения (4.5) – (4.8) показывают, что в результате сложения падающей и отраженной волн создается плоская гармоническая волна той же частоты, но с амплитудой, зависящей от расстояния  $x$  до границы раздела двух сред.

На рис. 4.1 приведены графики изменения амплитуды суммарной колебательной скорости  $a_1$  и суммарного звукового давления  $b_1$  для случая, когда акустическое сопротивление второй среды много больше, чем первой.

2.  $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$ . В этом случае, учитывая, что падающая и отраженная волны находятся в противофазе, суммарная колебательная скорость



$$v_2 = v_i + v_r = 2v_m \cos kx \sin kct$$

или 
$$v_2 = a_2 \sin kct, \quad (4.9)$$

где 
$$a_2 = 2v_m \cos kx. \quad (4.10)$$

Для суммарного звукового давления имеем

$$p_2 = -2p_m \sin kx \cos kct$$

или 
$$p_2 = b_2 \cos kct, \quad (4.11)$$

где 
$$b_2 = -2p_m \sin kx. \quad (4.12)$$

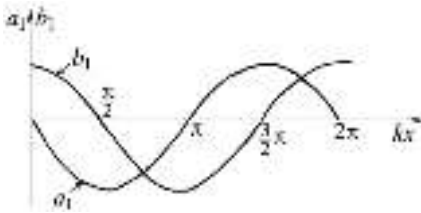


Рис. 4.1

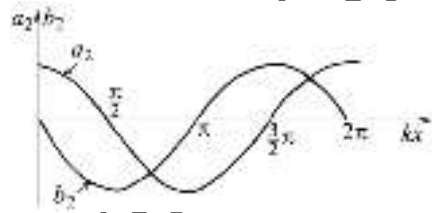


Рис. 4.2

На рис. 4.2 приведены графики изменения амплитуды суммарной колебательной скорости  $a_2$  и суммарного звукового давления  $b_2$  для случая, когда акустическое сопротивление второй среды много меньше, чем первой.

Анализируя полученные равенства, можно сделать следующие выводы.

1. В результате сложения падающей и отраженной волн в среде образуется суммарная волна, звуковое давление и колебательная скорость которой, изменяются со сдвигом по фазе на  $\pi/2$ .

2. В отличие от обычной бегущей волны, у которой амплитуды колебательной скорости и давления одинаковы для всех точек, в стоячей волне они не одинаковы и зависят по гармоническому закону от расстояния  $x$  до границы раздела сред. При этом в среде есть точки, в которых амплитуды  $p$  и  $v$  максимальны (*пучности*), и места, где колебаний нет вообще (*узлы*). Расстояния между узлами или пучностями равны  $0,5 \lambda$ , а между узлом и пучностью –  $0,25 \lambda$ .

3. Если в бегущей волне в любой момент времени смежные точки имеют неодинаковые фазы, то в стоячей волне все точки между соседними узлами, т.е. в пределах одной полуволны, совершают колебания с одинаковой фазой.

Определим интенсивность стоячей звуковой волны. Для этого в формулу (2.22) подставим значения колебательной скорости и звукового давления из равенств (4.9) и (4.11). Получим

$$I_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T a_2 \sin kct b_2 \cos kct dt = \frac{a_2 b_2}{T} \int_0^T \sin kct \cos kct dt = 0. \quad (4.13)$$

Таким образом, оказывается, что стоячая звуковая волна не переносит энергии.

## 4.2. Прохождение звука через обшивку корпуса судна

Рассматриваемый вопрос имеет большое практическое значение, так как на некоторых судах (например, на ледоколах) возникает необходимость в установке антенн эхолота без прорези днища судна, а также при установке антенн рыбопоисковых гидролокаторов в специальные обтекатели. В этом случае между двумя средами (внутренняя полость танка с антенной и морской водой за корпусом судна), имеющими одинаковое акустическое сопротивление, находится обшивка корпуса судна со значительно большим акустическим сопротивлением.

На рис. 4.3 приведена антенна эхолота, которая установлена в специальной выгородке (танке). Танк заполнен морской водой или специальной жидкостью с акустическим сопротивлением, равным акустическому сопротивлению морской воды.

В промежутке между антенной и корпусом судна, а также в самом корпусе судна существуют условия для возникновения стоячей звуковой волны. Необходимо расстояние  $S$  и толщину корпуса судна  $d$  подобрать таким образом, чтобы в точках  $O_1$  и  $O_2$  располагались пучности колебательной скорости. В этом случае в этих точках будем иметь максимумы кинетической энергии.

Как видно из графиков на рис. 4.1 – 4.2, указанные величины  $S$  и  $d$  определяются следующими выражениями

$$S = (2n + 1) \frac{\lambda_1}{4}, \quad (4.14)$$

где  $\lambda_1$  – длина волны в жидкости, заполняющей танк;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$d = n \frac{\lambda_2}{2}, \quad (4.15)$$

где  $\lambda_2$  – длина волны в обшивке корпуса судна.

Коэффициент преломления, с помощью которого можно оценить количество энергии, которое пройдет через обшивку корпуса судна, определяется выражением [1]:

$$B = \frac{4q^2}{4q^2 \cos^2\left(2\pi \frac{d}{\lambda_2}\right) + (1+q^2)^2 \sin^2\left(2\pi \frac{d}{\lambda_2}\right)}, \quad (4.16)$$

где  $B$  – коэффициент преломления, который определяет, какое количество звуковой энергии проходит через обшивку корпуса судна;  $q = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$ .

Равенство (4.16) соответствует формуле Рэлея, который впервые решил задачу о прохождении звука через промежуточный слой.

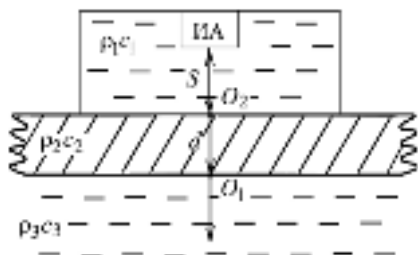


Рис. 4.3

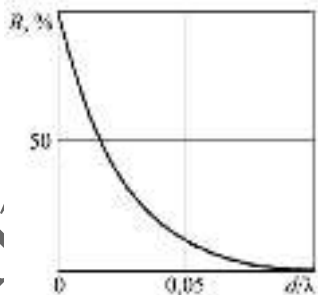


Рис. 4.4

Анализ выражения (4.16) позволяет сделать следующие выводы.

1. Если выполняется равенство (4.15), то коэффициент преломления  $B = 1$ . Это означает, что практически вся падающая звуковая энергия проходит через обшивку корпуса судна.

2. Если  $d \ll \lambda$ , то коэффициент преломления  $B \approx 1$ . Это означает, что при тонкой обшивке корпуса судна значительная часть звуковой энергии будет проходить через преграду. На рис. 4.4 приведена зависимость коэффициента преломления  $B$  от отношения  $d/\lambda$  для случая прохождения звуковых колебаний через стальную пластину. Анализ этой зависимости показывает, что при малых значениях  $d/\lambda$  через пластину проходит значительное количество звуковой энергии. По мере увеличения  $d/\lambda$  коэффициент  $B$  резко уменьшается.

В таблице приведены данные, показывающие зависимость количества в % звуковой энергии, проходящей через металл, от отношения  $d/\lambda$ .

$d/\lambda$	$d$ , мм	%
0,005	1,25	85
0,01	2,5	60
0,1	7,5	Менее двух

3. Если  $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ , то  $B = 1$ , т.е. при отсутствии границы раздела сред звуковая энергия распространяется без отражения.

В работе [2] показано, насколько важным является решение задачи установки антенн рыбопоисковой аппаратуры в танках или обтекателях.

### Контрольные вопросы

21. Для возникновения стоячей звуковой волны должны выполняться следующие условия:

- $\theta_i = 0$  (см. пояснение 4);
- $\theta_i = 90^\circ$  (см. пояснение 17);
- $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$  (см. пояснение 29);
- $\rho_2 c_2 \ll \rho_1 c_1$  (см. пояснение 47).

22. В стоячей звуковой волне амплитуда звукового давления

- такая же, как и в бегущей волне (см. пояснение 165);
- является величиной постоянной (см. пояснение 42);
- изменяется по закону  $\sin kx$  (см. пояснение 132);
- изменяется по закону  $\cos kx$  (см. пояснение 119).

23. В стоячей звуковой волне точки, в которых наблюдается удвоение

$\nu$  и  $p$ , называются

- узлами (см. пояснение 104);
- пучностями (см. пояснение 87).

24. Интенсивность стоячей звуковой волны

- равна нулю (см. пояснение 75);
- равна удвоенному значению интенсивности падающей волны (см. пояснение 134);
- изменяется по закону  $\sin kx$  (см. пояснение 110);
- изменяется по закону  $\cos kx$  (см. пояснение 125).

25. При установке антенны эхолота без прорези днища судна необходимо выполнить два условия, одно из которых имеет вид

$$S = (2n + 1) \frac{\lambda_1}{4}.$$

Здесь  $\lambda_1$ :

- длина волны в жидкости, которая заполняет танк (см. пояснение 139);
- длина волны в морской воде (см. пояснение 46);
- длина волны в корпусе судна (см. пояснение 150).

## Лекция 6

### 5. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МОРЕ

Глубокое море ни с механической (в обычном смысле этого слова), ни с акустической точки зрения нельзя считать однородной средой. Действительно, в морской воде взвешено огромное количество частичек грунта, пузырьков газа, зоо- и биопланктона и т.п. Кроме того, вся толща морской воды акустически неоднородна ( $\rho c \neq \text{const}$ ). Эта неоднородность, естественно, обуславливает некоторые особенности распространения звука, сопровождающегося такими явлениями, как изменение скорости звука, рефракция, дифракция, реверберация.

#### 5.1. Скорость звука в море

Скорость распространения звуковых волн – важнейшая акустическая характеристика, которая во многом определяет картину распространения звуковых волн и точность работы гидроакустических приборов. Для случая неограниченной однородной жидкости ранее было найдено соотношение

$$c = \sqrt{\frac{1}{K\rho}}, \quad (5.1)$$

известное как *формула Лапласа*. Следует помнить, что величина  $K$  соответствует адиабатическому коэффициенту сжимаемости жидкости. Экспериментальные исследования в море показали, что величины, входящие в формулу (5.1), являются функциями температуры  $t$ , солёности  $S$  ‰ и статического давления  $P_0$ , т.е.

$$K = f_1(t, S \text{ ‰}, p_0) \text{ и } \rho = f_2(t, S \text{ ‰}, p_0).$$

Плотность морской воды  $\rho$  растет с увеличением давления и солёности, а с повышением температуры уменьшается. При этом изменения  $\rho$  по сравнению с изменениями коэффициента сжимаемости  $K$  настолько малы, что ими можно пренебречь. Коэффициент  $K$  уменьшается с увеличением  $t$ ,  $S \text{ ‰}$  и  $p_0$ , причем менее всего на плотности воды сказывается изменение давления.

В реальных условиях в море величины  $t$ ,  $S \text{ ‰}$  и  $p_0$  непостоянны во времени и в пространстве, и если в горизонтальных направлениях на небольших расстояниях можно принять градиенты величин  $t$ ,  $S \text{ ‰}$  и  $p_0$  приблизительно равными нулю, то в вертикальном направлении температура, солёность и гидростатическое давление значительно зависят от глубины. При этом  $S \text{ ‰}$  и  $p_0$  увеличиваются с глубиной, а температура  $t$  может иметь и обратный ход. Летом, когда верхние слои моря сильно прогреваются, температура понижается с глубиной, причем, ее изменения могут достигать  $0,1^\circ$  на метр. В зимнее время, наоборот, температура повышается при увеличении глубины, но величины температурных градиентов обычно не превышают  $0,01^\circ$  на метр. Изменения  $K$  и  $\rho$  за счет непостоянства температуры, солёности и гидростатического давления обуславливают функциональную зависимость

$$c = f(t, S \text{ ‰}, p_0).$$

При увеличении температуры  $t$  на  $1^\circ \text{C}$  скорость звука увеличивается приблизительно на 3,6 м/с, с увеличением солёности на 1 ‰ – примерно на 1,2 м/с, а с увеличением глубины на 10 м (т.е. при возрастании гидростатического давления на 1 атм) она повышается примерно на 0,2 м/с. В среднем в морских условиях скорость звука может изменяться в пределах 1440 ... 1580 м/с.

В связи с тем, что в распределении температуры и солёности морской воды нельзя установить какой-либо общей закономерности, вычисление скорости звука по формуле Лапласа становится затруднительным. Поэтому на практике чаще используют эмпирические формулы, полученные на основе непосредственных измерений. Из них наиболее достоверной является формула Дель-Гроссо:

$$c = 1448,6 + 4,618 t - 0,0523 t^2 + 0,00023 t^3 + 1,25(S \text{ ‰} - 35) - 0,011 (S \text{ ‰} - 35) t + 0,0027 \cdot 10^{-5} (S \text{ ‰} - 35) t^4 - 2 \cdot 10^{-7} (S \text{ ‰} - 35)^4 (1 + 0,577 t - 0,0072 t^2) + 0,018h, \quad (5.2)$$

которая обеспечивает определение скорости звука с точностью  $\pm (0,5 \dots 0,8)$  м/с.

В последнее время в употребление входят различные (*прямые и косвенные*) методы непосредственного измерения скорости звука в море. К прямым методам, в которых используется известное соотношение между расстоянием, скоростью и временем, относится *импульсный метод*, детально разработанный С.Я. Соколовым. Импульсный измеритель скорости звука определяет время  $t_2 - t_1$ , затраченное ультразвуковым импульсом на прохождение слоя испытываемой жидкости фиксированной толщины  $l$  (базы). Это позволяет вычислить скорость распространения на основании равенства

$$c = \frac{l}{t_2 - t_1}. \quad (5.3)$$

Эффективным косвенным методом оказался так называемый *фазовый метод*, предложенный еще в 30-е гг. XX в. Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси. Сущность его заключается в следующем. Пусть фаза колебаний, излучаемых в момент времени  $t_1$ , имеет значение  $\psi_1 = \omega t_1$ . За промежуток времени  $t_2 - t_1$  акустическая волна пройдет путь  $l$  от излучателя до приемника:

$$l = c(t_2 - t_1).$$

К концу пути фаза колебаний изменится до величины  $\psi_2 = \omega t_2$ , т.е. получит приращение

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = \omega(t_2 - t_1) = \omega \frac{l}{c} = \frac{2\pi l}{c} f.$$

Таким образом, измеряя приращение фазы  $\Delta\psi$  при условии постоянства частоты  $f$  и акустической базы  $l$ , можно определить скорость звука  $c$ . Отечественный фазометр, которым оснащаются гидрографические и океанографические суда, обеспечивает измерение звука с точностью  $\pm 0,1\%$ .

На практике используется также так называемый *циклический измеритель скорости звука*. В этом приборе принятый импульс запускает генератор, т.е. управляет посылкой. Благодаря этому частота  $f^*$  посылок составит

$$\frac{1}{f^*} = t_0 + \frac{l}{c},$$

где  $t_0$  – время, определяющее электрическую инерцию схемы;

$l$  – база между излучателем и приемником.

Величины  $t_0$  и  $l$  получают при калибровке прибора в жидкости с известным  $c$ . При таких условиях скорость звука  $c$  определится выражением

$$c = \frac{f^* l}{1 - f^* t_0}. \quad (5.4)$$

**Лучевые картины.** Все рассмотренные ранее способы позволяют определить скорость звука в точке. Правда, в большинстве случаев скорость звука в горизонтальных направлениях меняется настолько незначительно, что найденное значение  $c$  можно рассматривать как горизонтальную скорость звука. В то же время, на практике чаще всего необходимо знать скорость звука в вертикальном (при измерении глубин) или произвольном (в гидролокации) направлении. Распределение скорости звука в вертикальном направлении может быть самым разнообразным.

Зависимость вертикальной составляющей скорости звука от глубины обычно характеризуют так называемыми *лучевыми картинками*. Рассмотрим некоторые наиболее типичные из них.

**Слой с постоянным значением скорости звука.** Эта лучевая картина (рис. 5.1) характерна для очень мелкого моря (до десяти метров), где изменением скорости звука за счет гидростатического давления можно пренебречь, а температура  $t$  и соленость  $S$  ‰ постоянны благодаря непрерывному перемешиванию воды за счет действия ветра, волнения, конвекционных токов, течений и т.д.

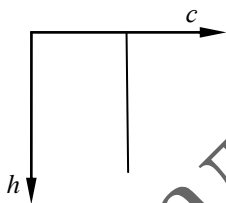


Рис. 5.1

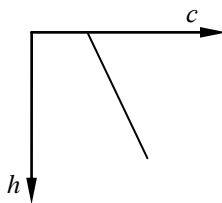


Рис. 5.2

**Слой с постоянным градиентом скорости звука.** Лучевая картина на рис. 5.2 может иметь место в мелком море с глубиной 50 ... 70 м, а также в поверхностном слое воды глубокого моря, где температура  $t$  и соленость  $S$  ‰ постоянны за счет перемешивания. Скорость звука изменяется здесь только за счет изменения гидростатического давления  $p_0$ .

Аналогичная лучевая картина имеет место также при наличии постоянного градиента температуры.

**Слой скачка.** Этот слой (рис. 5.3) обычно образуется на границе раздела поверхностного и глубинного слоев воды. Обычно на этом горизонте температура изменяется скачком. Толщина слоя скачка может быть от нескольких сантиметров до нескольких метров. При прохождении звуком



слоя скачка градиент скорости может даже изменить знак на обратный. Слой скачка может так же образоваться за счет изменения солености (так называемый *жидкий грунт*).

**Звуковой канал.** Свообразные условия для распространения звуковых волн возникают в глубоком море, когда глубины превышают 1000 м (рис. 5.4). На таких глубинах температура, а, следовательно, и скорость звука постепенно уменьшаются до некоторой постоянной величины, соответствующей максимальному значению плотности морской воды. Ниже горизонта этой критической температуры располагается изотермический слой. Однако скорость звука начинает возрастать благодаря увеличению гидростатического давления, причем величина  $c$  может превысить значение скорости звука у поверхности моря.

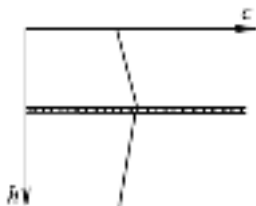


Рис. 5.3

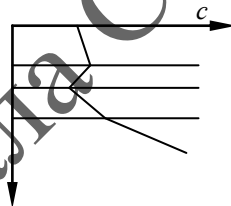


Рис. 5.4

Таким образом, образуется слой воды, скорость звука в котором значительно меньше, чем в слоях, расположенных сверху и снизу. Такие условия распространения получили название *звукового канала*, или *волновода*. Положение звукового канала определяется тремя горизонтами: осью волновода, на которой  $c$  имеет минимальное значение, и верхней и нижней границами, соответствующими уровням наибольшей скорости звука. Более или менее выраженный звуковой канал наблюдается почти во всех океанах и многих морях.

## 5.2. Рефракция звуковых лучей

Море нельзя считать акустически однородной средой, так как скорость звука и плотность морской воды являются функциями координат. Можно предположить, что толща морской воды состоит из отдельных горизонтальных слоев бесконечно малой толщины (рис. 5.5), в каждом из которых скорость звука и плотность постоянны.

Звуковой луч, распространяясь в такой слоистой среде, переходя от слоя к слою, будет испытывать преломление, что приведет к его искривлению. При этом часть звуковой энергии будет рассеиваться за счет отражения. Явление искривления звуковых лучей вследствие неоднородности морской воды называется *рефракцией звука*.

Наглядное представление о рефракции дают лучевые картины, которые рассчитываются по результатам непосредственных измерений скорости звука в море. Лучевая картина изображает траекторию звукового луча в вертикальной плоскости. Форма траектории определяется функциональной зависимостью  $c = f(x, z)$  и, следовательно, в общем случае будет иметь вид произвольной кривой.

Из рис. 5.5 видно, что если излучать звуковую энергию по нормали к границам раздела, то в том случае искривления звукового луча не будет. Это означает, что на работу эхолота рефракция влияет незначительно. Однако рефракция звука может оказать большое влияние на результаты гидролокационных измерений. Поэтому рассмотрим наиболее типичные лучевые картины, имеющие практическое значение в гидролокации.

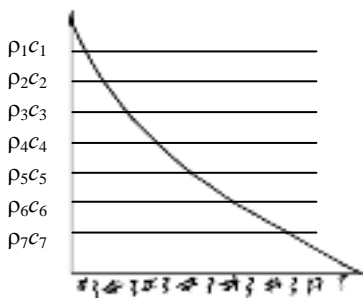


Рис. 5.5

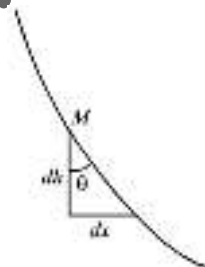


Рис. 5.6

**Рефракция в слое с постоянным градиентом скорости звука.** Уравнение звукового луча в этом случае получим, исходя из следующих соображений. По определению вертикальный градиент скорости звука

$$g_c = \frac{dc}{dh}, \quad (5.5)$$

где  $h$  – глубина.

Выделим в точке  $M$  (рис. 5.6) элемент траектории звукового луча и построим треугольник со сторонами  $dh$ ,  $dx$ . Из этого треугольника находим

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dx}{dh}, \quad (5.6)$$

где  $\theta$  – угол падения.

На основании равенства для  $c^*$  скорость звука  $c$  в точке  $M$  можно выразить через постоянную Снеллиуса. Действительно, из выражения для  $c^*$  имеем  $c = c^* \sin \theta$ ,  $dc = c^* \cos \theta d\theta$ .

Тогда, после подстановки величины  $dc$  в формулу (5.5), будем иметь:

$$dh = \frac{c^*}{g_c} \cos \theta d\theta. \quad (5.7)$$

Наконец, заменив  $dh$  в выражении (5.6) на его значение из уравнения (5.7), получим

$$dx = \frac{c^*}{g_c} \sin \theta d\theta. \quad (5.8)$$

Если начало координат выбрать в точке  $c = 0$ ,  $\theta = 0$ , то при интегрировании уравнений (5.7) и (5.8) постоянные интегрирования будут равны нулю, поэтому

$$h = \frac{\sin \theta}{g_c} c^*; \quad x = \frac{\cos \theta}{g_c} c^*.$$

Возводя выражения для  $x$  и  $h$  в квадрат и складывая их, получим уравнение звукового луча в виде

$$x^2 + y^2 = \left( \frac{c^*}{g_c} \right)^2. \quad (5.9)$$

Выражение (6.9) показывает, что в слое с постоянным градиентом скорости звуковой луч распространяется по дуге окружности с радиусом

$$r = \frac{c^*}{g_c}.$$

Если градиент положительный, то кривая обращена выпуклостью к поверхности моря, если  $g_c$  имеет отрицательное значение – в сторону морского дна.

**Рефракция в слое скачка.** В глубоком море толщу воды можно разделить на три основных слоя: поверхностный изотермический слой, слой скачка и придонный слой холодной воды, практически тоже изотермический.

При прохождении звуковой волны через слой скачка наблюдаются два характерных эффекта: сильная рефракция и значительный спад интенсивности звука ниже слоя скачка (рис. 5.7). Уменьшение интенсивности обу-

словлено расширением фронта волны (расхождение лучей) за счет резкой рефракции на верхней границе слоя скачка. Кроме того, часть звуковых лучей, испытывая полное внутреннее отражение, отклоняется в сторону поверхности моря. Крайние (предельные) лучи расщепившегося пучка образуют зоны звуковой тени.

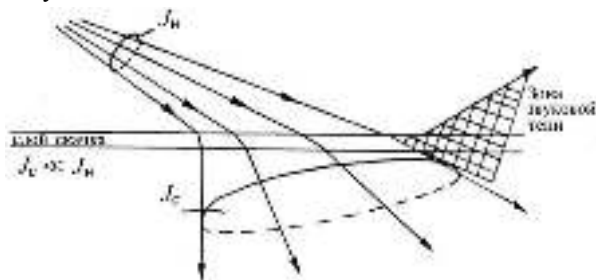


Рис. 5.7

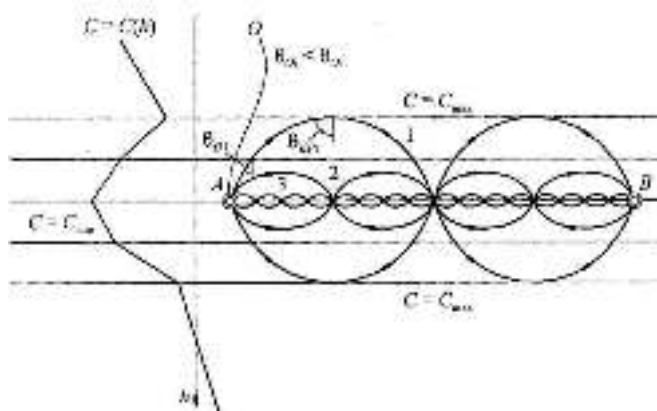


Рис. 5.8

**Рефракция в звуковом канале.** Рефракция звуковых лучей в условиях звукового канала обуславливает явление сверхдальнего распространения звука. Если расположить источник и приемник звука у оси звукового канала (рис. 5.8), то звук благодаря рефракции будет фокусироваться в пределах верхнего и нижнего горизонтов, чем и объясняется сверхдальнее распространение акустических волн.

Звуковые каналы подразделяются на *глубинные* и *поверхностные*. Первые образуются в результате возрастания скорости звука с глубиной

под воздействием увеличивающегося статического давления; вторые – под воздействием теплых соленых вод, подстилающих верхние холодные и менее соленые слои воды.

Ось глубоководного звукового канала – горизонталь, проходящая через минимум скорости звука, – находится на больших глубинах ( $\approx 1000$  м), тогда как ось поверхностного канала обычно располагается недалеко от поверхности моря (10 ... 60 м). В некоторых районах Мирового океана могут одновременно существовать оба вида звуковых каналов.

Волноводные свойства звукового канала можно объяснить следующим образом. Поместим на оси канала источник  $A$  и приемник  $B$  звуковых колебаний, а затем построим лучевую картину пучка лучей, излученных под разными углами к горизонту (см. рис. 5.8). Пусть луч  $l$ , характеризующийся начальным углом падения  $\theta_{01}$ , распространяется к верхней границе волновода. Так как скорость звука в этом направлении непрерывно увеличивается, то для сохранения обязательного условия:

$$c^* = \frac{c_{\min}}{\sin \theta_{01}} = \text{const}$$

угол  $\theta$ , должен возрастать. При этом луч будет постепенно наклоняться к оси канала. Увеличение угла  $\theta$ , будет происходить до тех пор, пока его величина не станет критической, т.е.  $\sin \theta_{i \text{кр}} = \frac{c_{\min}}{c_{\max}}$ .

При этом луч  $l$  проходит по касательной к уровню  $c_{\max}$ , загибаясь вовнутрь канала. Дальнейшее его движение можно изобразить в виде кривой линии, напоминающей синусоиду, многократно пересекающую ось волновода. Рассмотренный пример совместно с данными эксперимента позволяет сделать следующие выводы.

1. Лучи, у которых начальный угол  $\theta_{0i} \gg \theta_{01}$ , не выходят за пределы звукового канала. Энергия их расходуется, главным образом, на преодоление вязкости морской воды.

2. Чем больше величина неравенства  $\theta_{0i} \gg \theta_{01}$ , тем меньше отклонение луча от оси волновода и больше частота пересечений его с осью (лучи 2, 3 на рис. 5.8).

3. Наибольший путь к приемнику проходят лучи, имеющие минимальное значение начального угла падения, т.е.  $\theta_{0i} = \theta_{01}$ . Несмотря на это, они приходят к цели первыми, так как средняя скорость их распространения

ния будет больше, чем у любого другого луча. Наименьшей скоростью обладают лучи, распространяющиеся по оси звукового канала.

4. Разница во времени между моментами  $t_1$  и  $t_2$  прихода первого и последнего (осевого) лучей составляет приблизительно 65 с на 100 км пути. По измеренному промежутку времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  можно достаточно точно определить расстояние между источником и приемником звука.

Звуковые каналы находят все большее практическое применение. Демонстрацией тому является, например, американская система подводной сигнализации «Софар». Она используется для наблюдения за подводной вулканической деятельностью, применяется при оказании помощи терпящим бедствие судам и, наконец, является навигационной системой дальнего действия.

Опорные станции системы располагаются на береговых склонах материков и островов океана и ведут круглосуточное «прослушивание» моря. Если где-то в толще воды произойдет взрыв, например, специальной глубинной бомбы, сброшенной на ось звукового канала терпящим бедствие судном, то каждая из станций зафиксирует момент прихода звукового импульса. Все станции передают эту информацию в вычислительный центр системы, который образует соответствующие разности времени и, пользуясь гиперболическими линиями положения, рассчитывает координаты места взрыва. Система «Софар» применяется также для определения места подводных лодок. Для этой цели вблизи опорных пунктов по особому расписанию взрываются небольшие заряды. На корабле определяются моменты прихода ударных звуковых волн. Таким образом, появляется возможность вычислить промежутки времени между посылкой и приходом импульса, а, следовательно, и расстояния до станций, т.е. определить место корабля.

### 5.3. Реверберация

Реверберация проявляется в том, что после прекращения излучения в течение определенного промежутка времени (от долей секунды до нескольких секунд) в приемнике наблюдается постепенно убывающий по силе звук. Явление реверберации оказывает существенное влияние на эффективность гидроакустических приборов, маскируя полезный акустический сигнал. Если, например, при работе гидролокатора эхо от неподвижного объекта приходит к приемнику через некоторое время после

посылки сигнала, а уровень реверберации к этому моменту окажется выше уровня эхо-сигнала, то прием сигнала будет невозможен (момент времени  $t_1$  на рис. 5.9). И наоборот, если реверберация к моменту приема спадет настолько, что эхо превысит ее, то эхо-сигнал будет зафиксирован (момент времени  $t_2$  на рис. 5.9). Кроме того, в случае локации движущегося объекта возможна частотная селекция эхо-сигнала.

В нашей стране первое и наиболее полное теоретическое и экспериментальное исследование реверберации в море было выполнено Ю.М. Сухаревским. Реверберация в море порождается рассеиванием звука различными неоднородностями морской среды (газовыми пузырьками, твердыми взвешенными частичками), неровностями дна и поверхности моря. Различают реверберацию объемную, поверхностную и донную.

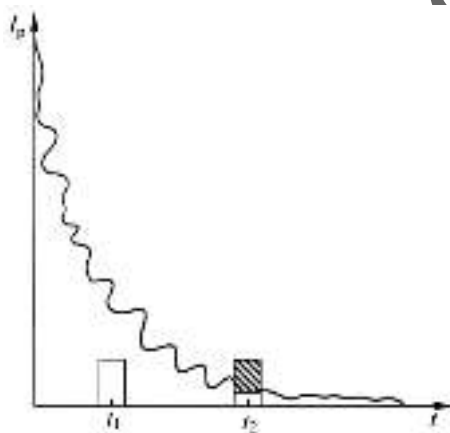


Рис. 5.9

*Объемной реверберацией* является реверберация, обусловленная рассеиванием звука малыми частицами, насыщающими глубинные слои воды. Здесь основную роль играют такие рассеиватели, как газовые пузырьки, твердые взвешенные частички, термические неоднородности и т.д. Интенсивность подобного рода реверберации определяется выражением

$$I_{OP} = K_1 \frac{N\tau}{t^2} 10^{-0,2\beta ct}, \quad (5.10)$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональности;  $N$  — мощность излучаемого сигнала;  $\tau$  — длительность излучаемого импульса;  $\beta$  — коэффициент поглощения звука;  $c$  — скорость звука.

*Поверхностная реверберация* обусловлена рассеянием звука приповерхностным слоем воды и взволнованной поверхностью моря. Интенсивность поверхностной реверберации определяется равенством

$$I_{\text{ПР}} = K_2 \frac{N\tau}{t^3} 10^{-0,2\beta ct}. \quad (5.11)$$

*Донная реверберация* вызывается рассеянием звука морским дном. Для определения интенсивности донной реверберации можно использовать формулу

$$I_{\text{ДР}} = K_3 \frac{N\tau}{t^4} 10^{-0,2\beta ct}. \quad (5.12)$$

Отмеченное деление реверберации на три вида является, в известной степени, условным. Как видно из выражений (5.10) – (5.12), медленней всех убывает объемная реверберация и быстрее всех – донная

На первый взгляд может показаться, что уменьшая мощность излучаемого сигнала  $N$  или длительность импульса  $\tau$ , можно уменьшить влияние реверберации на работу гидроакустического прибора. Но это, к сожалению, не так. При уменьшении  $N$  и  $\tau$  будет таким же образом уменьшаться и интенсивность полезного сигнала. На практике для снижения влияния реверберации в гидроакустической аппаратуре применяются схемы временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ). Смысл её заключается в том, что коэффициент усиления приемного тракта изменяется по закону, обратному закону изменения интенсивности реверберации.

#### **5.4. Дифракция звуковых волн**

Дифракция – это способность звуковых волн при определенных условиях огибать встречающиеся на пути препятствия. Пояснить явление дифракции можно с помощью принципа Гюйгенса.

На рис. 5.10 показано распространение звуковой волны в случае, когда на ее пути встречается препятствие, размеры которого соизмеримы с длиной волны. При достижении фронтом звуковой волны  $Q$  препятствия часть звуковой энергии отражается. В соответствии с принципом Гюйгенса точки фронта волны  $1 \dots 6$  являются элементарными источниками сферических звуковых волн. Проводя касательную к фронтам этих волн, получаем новое положение фронта плоской звуковой волны. Выбираем точки среды, которые также являются элементарными источниками сферических волн, и определяем следующее положение фронта плоской звуковой волны и т.д.



В конечном итоге возникает фронт плоской звуковой волны, распространяющейся за препятствием. Непосредственно за преградой возникает зона звуковой тени.

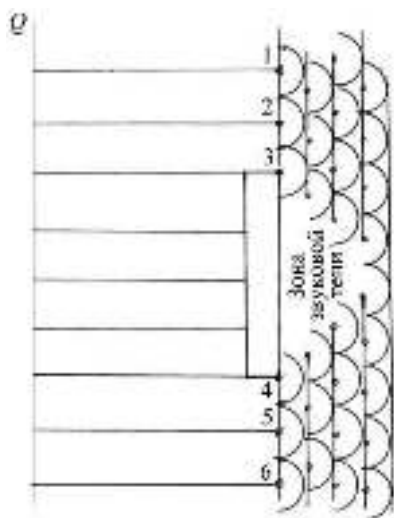


Рис. 5.10

Если размер препятствия будет значительно больше, чем длина волны, то вся энергия от него отразится, а за препятствием будет сплошная зона звуковой тени. Если размер препятствия будет значительно меньше длины волны, то в этом случае звуковая волна проходит дальше, как бы не замечая препятствия, т.е. само препятствие может быть не обнаружено.

Явлением дифракции можно объяснить наличие или отсутствие контакта с целью при гидролокации.

### 5.5. Влияние относительного движения источника или приемника звука на параметры звуковой волны

Этот вопрос имеет большое практическое значение. Зададим плоскую звуковую волну потенциалом скорости

$$\varphi = \varphi_m \cos k(ct - x) = \varphi_m \cos(\omega t - kx) = \varphi_m \cos(kx - \omega t). \quad (5.13)$$

Для удобства анализа преобразуем фазу потенциала скорости  $kx$  в векторную форму. С этой целью введем два вектора (рис. 5.11): радиус-вектор  $\vec{r}$  интересующей нас точки звукового поля  $M$  и волновой вектор  $\vec{k}$ , совпадающий с направлением распространения волны.

Обозначим через  $\bar{n}$  единичный вектор в направлении распространения волны. Тогда вектор  $k\bar{n} = \bar{k}$  можно назвать *волновым вектором*. Введем волновой вектор в выражение (5.13). Из рис. 5.11 имеем

$$x = r \cos \theta \text{ или } kx = kr \cos \theta.$$

Если через  $\bar{m}$  обозначить единичный вектор в направлении радиус-вектора  $\bar{r}$  и учесть, что скалярное произведение двух единичных векторов  $\bar{n}\bar{m} = \cos \theta$ , то

$$kx = kr \cos \theta = kr\bar{n}\bar{m} = \bar{k}\bar{r}.$$

С учетом этого равенство (6.13) примет вид

$$\varphi = \varphi_m \cos(\bar{k}\bar{r} - \omega t). \quad (5.14)$$

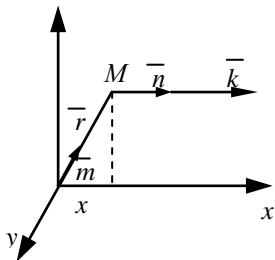


Рис. 5.11

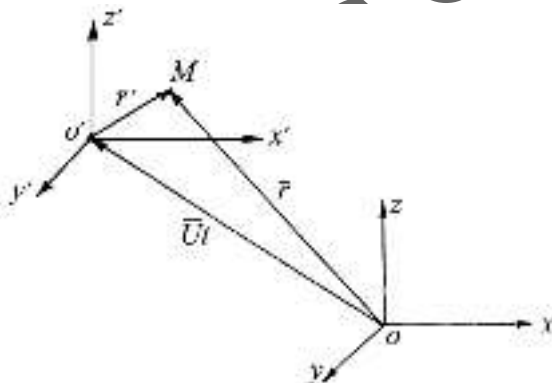


Рис. 5.12

Предположим теперь, что приемник звука перемещается относительно излучателя со скоростью  $\bar{U}$ , и определим значение потенциала скорости  $\varphi$  в произвольной точке  $M$ . Для этого введем в рассмотрение две координатные системы. Прямоугольную координатную систему  $x'y'z'o'$  неразрывно свяжем с приемником, а координатную систему  $x,y,z,o$ , которая связана с излучателем, считаем неподвижной.

В системе координат  $x'y'z'o'$  точка  $M$  является неподвижной относительно приемника звука. Следовательно, справедливо выражение

$$\varphi_M = \varphi_m \cos(\bar{k}\bar{r}' - \omega t).$$

Для того, чтобы получить равноценное выражение в неподвижной системе координат  $x,y,z$ , необходимо, как это видно из рис. 5.12, в равенстве (5.14) выполнить замену  $\bar{r}'$  на  $\bar{r}$ .

Функциональная связь между векторами  $\vec{r}'$  и  $\vec{r}$  легко определяется из векторного треугольника  $OO'M$ . Замыкающий вектор

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{U}t . \quad (5.15)$$

Подставляя равенство (5.15) в выражение (5.14), получим

$$\varphi = \varphi_m \cos [\vec{k}(\vec{r} - \vec{U}t) - \omega t] = \varphi_m \cos [\vec{k}\vec{r} - (\omega + \vec{k}\vec{U})t] . \quad (5.16)$$

В любом выражении, определяющем гармонические колебания, коэффициент при времени всегда представляет собой частоту этих колебаний. Поэтому на основании выражения (5.16) можно сделать следующее заключение: *движение приемника относительно излучателя со скоростью  $\vec{U}$  обуславливает изменение частоты звуковой волны*. Частота  $\omega_*$  звуковой волны, которая поступает в приемник,

$$\omega_* = \omega + \vec{k}\vec{U} . \quad (5.17)$$

Если приемник установлен на судне, которое движется со скоростью  $\vec{V}_c$ , то выражение (5.17) можно записать в виде

$$\omega_* = \omega - \vec{k}\vec{V}_c . \quad (5.18)$$

Таким образом, если приемник звука перемещается относительно излучателя, то частота сигнала, который поступает в приемник, отличается от частоты, которая излучается источником звука. Это явление называется *эффектом Доплера*.

### Контрольные вопросы

26. Для определения скорости звука в жидкости имеется формула Ла-

пласа 
$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \kappa}}$$

Можно ли по этой формуле рассчитать скорость звука в море:

- да (см. пояснение 5);
- нет (см. пояснение 24).

27. Скорость звука в море зависит от следующих факторов:

- солёности (см. пояснение 30);
- температуры (см. пояснение 48);
- глубины (см. пояснение 64);
- прозрачности воды (см. пояснение 158);
- неоднородности среды (см. пояснение 164).

28. Реверберация бывает следующих видов:

- объемной (см. пояснение 149);
- донной (см. пояснение 131);
- поверхностной (см. пояснение 118);
- глубиной (см. пояснение 103).

29. Если источник или приемник звука перемещаются относительно друг друга, то принимаемый сигнал отличается от излучаемого следующими параметрами:

- амплитудой (см. пояснение 94);
- частотой (см. пояснение 163);
- фазой (см. пояснение 148).

30. Для определения интенсивности объемной реверберации служит формула

$$I_{OP} = K_1 \frac{N\tau}{t^2} 10^{-0,2\beta ct} .$$

Изменением, каких величин можно уменьшить интенсивность этой реверберации:

- величины  $N$  (см. пояснение 130);
- величины  $\tau$  (см. пояснение 100);
- величины  $t$  (см. пояснение 63);
- величины  $\beta$  (см. пояснение 41).

### Лекция 7

## 6. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА

В 1916 г. русским инженером К.В. Шиловским и французским ученым П. Ланжевром был изобретен прибор для подводной гидролокации, который явился прообразом современного гидролокатора.

Звуковые мощности современных гидролокаторов весьма значительны. Их можно сравнить с мощностью одновременного крика десятков тысяч людей, а по интенсивности с сигналом современного гидролокатора может сравниться только рев стартующей ракеты.

### 6.1. Колебательные системы антенн

Звуковая энергия может возникнуть лишь в результате преобразования какого-либо другого вида энергии. В гидроакустике задача преобразования того или иного вида энергии в звуковую или обратно решается

с помощью особых устройств – *преобразователей*. Последние подразделяют на излучатели и приемники. Совокупность излучателя или приемника вместе со вспомогательными устройствами называется *гидроакустической антенной* (излучающей или принимающей).

Гидроакустические антенны классифицируются по принципу преобразования энергии, по способу формирования направленности, по количеству преобразователей в составе антенны, по характеру колебания и конфигурации излучающей поверхности.

По принципу преобразования энергии антенны бывают *магнитострикционные* и *пьезоэлектрические*, в которых используется магнитострикционный или пьезоэлектрический эффект.

По способу формирования направленности антенны бывают:

- *рупорные*, в которых направленность формируется применением конического отражателя;
- *фокусирующие*, за счет создания специальной формы излучающей поверхности;
- *интерференционные*, у которых направленность создается за счет сложения звуковых волн, создаваемых каждой точкой излучающей поверхности;
- *параметрические*, у которых направленность формируется за счет нелинейного взаимодействия звуковых волн большой амплитуды.

По количеству преобразователей антенны бывают *одноэлементные* и *многоэлементные*.

По характеру колебания излучающей поверхности антенны бывают *поршневые* и *непоршневые*. Все точки излучающей поверхности поршневой антенны колеблются одинаково, а непоршневой – с разными фазами или амплитудами. Непоршневые антенны могут быть только многоэлементными.

В зависимости от того, какую конфигурацию имеет излучающая поверхность, гидроакустические антенны бывают *поверхностные* и *линейные*. Если один из размеров излучающей поверхности антенны больше длины волны, а другой – значительно меньше, то это линейная антенна. Если оба размера излучающей поверхности больше длины волны, то это поверхностная антенна, у которой форма излучающей поверхности может быть *плоской, цилиндрической* или *сферической*.

Кроме того, по типу колебательной системы антенны могут быть *пластинчатые, стержневые и цилиндрические*.

В любом преобразователе переход электрической энергии в звуковую или обратно происходит не непосредственно, а через промежуточный вид энергии, каким является механическая энергия колебательной системы антенны. Последняя приходит в колебательное состояние под влиянием внешнего воздействия. В излучателях таким внешним фактором является электрический импульс специального генератора. В приемниках механическая сила, вызывающая движение колебательной системы, возникает в результате воздействия звуковой волны. Получившиеся механические колебания преобразуются затем в электрические. Таким образом, механическая колебательная система является одним из основных элементов антенны.

Чаще всего роль колебательной системы выполняют сделанные из упругого материала стержни или пластины, закрепленные определенным образом. Колебательный процесс стержня связан с образованием упругих волн, причем волновая картина может быть очень сложной благодаря возникновению продольных, поперечных и поверхностных волн. Однако в большинстве случаев для возбуждения акустических волн в среде используют лишь продольные колебания стержня.

Рассмотрим колебательную систему антенны в виде упругого стержня, закрепленного посередине, который колеблется в направлении длины (рис. 6.1). Для того, чтобы стержень совершал колебательное движение вдоль длины, в нем необходимо возбудить продольную волну. Так как акустическое сопротивление стержня гораздо больше акустического сопротивления окружающей среды (в нашем случае морская вода), и звуковая энергия падает нормально на границу раздела сред, в стержне возникает стоячая звуковая волна. Известно, что в таких волнах имеются пучности, где наблюдаются максимумы параметров звуковой волны и узлы, где эти параметры равны нулю. Торцы стержня соприкасаются с морской водой. Значит, для возбуждения в воде звуковой волны, имеющей максимальную амплитуду смещения частиц жидкости из положения равновесия, необходимо, чтобы на концах стержня были пучности смещения торцевой поверхности.

Учитывая, что в стоячей звуковой волне расстояние между пучностями равно  $\lambda/2$ , необходимо иметь стержень длиной

$$L = \frac{\lambda}{2}. \quad (6.1)$$

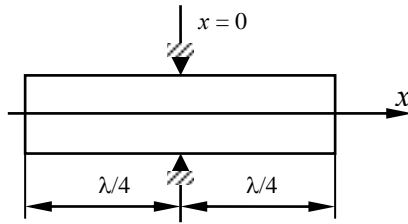


Рис. 6.1

Так как круговая частота звуковой волны определяется выражением

$$\omega = ck, \tag{6.2}$$

где  $c$  – скорость распространения звука;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число, скорость звука для твердых тел можно определить с помощью формулы Лапласа

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{6.3}$$

где  $E$  – модуль Юнга;

$\rho$  – плотность материала стержня,

для частоты колебаний стержня можно получить

$$\omega = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

а также с учетом выражения (6.1) получим

$$\omega = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \tag{6.4}$$

Известна связь между круговой частотой и линейной:

$$\omega = 2\pi f.$$

Тогда выражение (6.4) можно записать в виде равенства

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{6.5}$$

которое определяет частоту собственных колебаний стержня. Однако учитывая, что колебательные системы антенн работают в режиме резонанса, когда частота собственных колебаний равна частоте колебаний вынужденных, данное равенство можно использовать для расчета рабочей частоты антенны.

## 6.2. Пьезоэлектрические и магнитострикционные антенны

В навигационных гидроакустических приборах наибольшее распространение получили два типа электромеханических преобразователей: пьезоэлектрические и магнитострикционные. Они могут работать как в режиме излучателя, так и в режиме приемника, т.е. являются обратимыми.

**Пьезоэлектрические антенны.** Работа этих антенн основана на использовании *пьезоэлектрического эффекта*, которым обладают некоторые кристаллические тела, такие, например, как кварц, сегнетова соль, титанат бария и др.

Материалом для чувствительного элемента пьезоэлектрических антенн долгое время служили кварц и сегнетова соль, открытая еще в 1672 г. аптекарем Пьером де ла Сегнет из маленького французского городка Ла-Рошель. Скромный аптекарь, конечно, не предполагал в то время, что возможно широкое применение найденного им вещества в качестве преобразователя энергии механических колебаний в электрическую энергию.

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 г. известными французскими физиками братьями Пьером и Жаком Кюри.

Рассмотрим сущность пьезоэффекта на примере кварца. Для этого вырежем из кристалла кварца прямоугольную пластинку, большие грани которой будут перпендикулярны электрической оси (рис. 6.2). На них нанесем методом напыления, например, серебряные электроды. Электрические диполи пластинки располагаются хаотично (рис. 6.2 а). Под действием внешней силы  $F$  (рис. 6.2 б) электрические диполи ориентируются вдоль действия силы. В результате этого на электродах появится разность потенциалов  $U_c$ . Другими словами, пластинка поляризуется. Если теперь изменить направление действия силы (пластинку растягивать), то полярность заряда изменится на противоположную. При действии силы, изменяющейся по периодическому закону, в цепи, соединяющей электроды, потечет переменный ток.

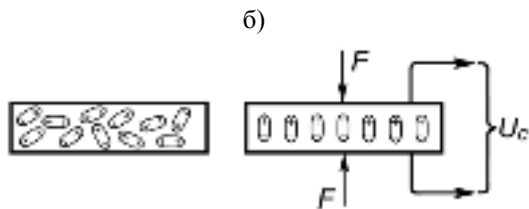


Рис. 6.2



Пьезоэффект обратим, т.е. кристалл, помещенный в электрическое поле, будет деформироваться. Это явление называется *обратным пьезоэффектом*.

Уравнения прямого и обратного пьезоэффекта имеют вид:

$$U = d \sigma - \text{прямой пьезоэффект}; \quad (6.6)$$

$$\Delta = d E - \text{обратный пьезоэффект}, \quad (6.7)$$

где  $U$  – разность потенциалов на электродах пьезокристалла;  $E$  – напряжение внешнего электрического поля;  $d$  – пьезомодуль – величина, которая зависит от материала (у разных материалов она различная);  $\sigma$  – напряжение внешней силы;  $\Delta$  – механическая деформация пластины.

Прямой пьезоэффект используется в принимающих антеннах, обратный – в излучающих.

Первые кварцевые гидроакустические антенны были сконструированы известным французским ученым П. Ланжевром. Такого типа антенны не получили широкого распространения из-за высокой стоимости, низкой прочности конструкции и необходимости подвода к электродам больших напряжений – до 5 тыс. вольт.

В 1944 г. советский академик Б.Д. Вул открыл новый пьезоэлектрический материал – *титанат бария* ( $\text{BaTiO}_3$ ), физические свойства которого настолько хорошо удовлетворяли требованиям гидроакустики, что он сразу нашел широкое применение. В 1946 г. за работы по физике диэлектриков и полупроводников Б.М. Вулу была присуждена Государственная, а в 1964 г. – Ленинская премия.

Титанат бария как пьезоэлектрик обладает следующими, присущими только ему, особенностями:

– пьезоэффект проявляется не только в монокристалле, но и в поликристаллических образцах, поэтому пьезоэлементы могут быть изготовлены любой формы;

– керамические пьезоэлементы дешёвы, обладают значительной механической и электрической прочностью;

– пьезомодуль  $d$  титаната бария примерно на два порядка больше, чем у кварца, поэтому для получения достаточных деформаций образца требуется сравнительно небольшое электрическое напряжение.

**Магнитострикционные антенны.** Принцип действия магнитострикционной антенны основан на использовании магнитострикционного эф-

факта, которым обладают некоторые ферромагнитные материалы: никель, кобальт, пермаллой и др. Магнитострикционный эффект бывает *прямым* и *обратным*.

Прямой магнитострикционный эффект в 1847 г. был открыт английским физиком Д.П. Джоулем, поэтому его называют *эффектом Джоуля*. Он заключается в следующем: *если ферромагнитный образец поместить в магнитное поле, то при изменении параметров поля будет наблюдаться изменение линейных размеров образца*.

Уравнение прямого магнитострикционного эффекта имеет вид

$$\Delta l = a_1 I_H^2, \quad (6.8)$$

где  $\Delta l$  – механическая деформация образца;  $a_1$  – магнитострикционная константа;  $I_H$  – интенсивность намагничивания.

Обратный магнитострикционный эффект, который в 1865 г. был открыт итальянским физиком Э. Виллари, заключается в следующем: *если намагниченный ферромагнитный образец подвергнуть механическому воздействию, то это приведет к изменению параметров постоянного магнитного поля*.

Уравнение обратного магнитострикционного эффекта имеет вид

$$\Delta H = a_2 \sigma, \quad (6.9)$$

где  $\Delta H$  – изменение напряженности магнитного поля;  $a_2$  – магнитострикционная константа;  $\sigma$  – напряжение внешней механической силы.

Магнитострикционный эффект у различных материалов проявляется по-разному. На рис. 6.3 приведены графики зависимости механической деформации образца  $\Delta l$  от магнитной индукции  $B$  поля. Магнитная индукция, являющаяся характеристикой магнитного поля ферромагнетика, связана с напряженностью внешнего магнитного поля следующим соотношением:

$$B = \mu H, \quad (6.10)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала.

С учетом того, что у ферромагнитных материалов  $\mu \gg 1$ , всегда имеем  $B \gg H$ .

Как видно из рис. 6.3, лучше всего магнитострикционный эффект проявляется у кобальтовой стали. Однако она бурно корродирует даже в воздухе, поэтому в гидроакустических антеннах не применяется. В гидроакустике широкое распространение получил отожженный никель. Пакет колебательной системы антенны набирается из отдельных пластин толщиной

0,1 ... 0,2 мм. При отжиге на поверхности никеля образуется тонкая оксидная пленка, являющаяся хорошим диэлектриком, поэтому никакой дополнительной изоляции между пластинами не требуется.

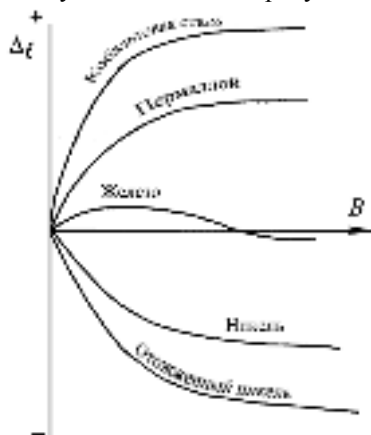


Рис. 6.3

Колебательная система антенны в виде набора изолированных никелевых пластин используется с целью предотвращения нагрева пакета под действием вихревых токов.

В гидроакустических приборах используются колебательные системы полосового и кольцевого типов.

В кольцевой антенне пакет собран из никелевых пластин кольцевой формы. При работе используются радиальные колебания, т.е. излучающей является боковая поверхность цилиндра, образованного пластинами. Для того, чтобы получить направленное излучение, антенна имеет специальный отражатель.

Различают *поляризованные* и *неполяризованные* антенны. Рассмотрим реакцию колебательной системы той и другой антенны на изменение магнитного поля.

**Неполяризованная антенна.** На рис. 6.4 показана колебательная система антенны в виде круглого стержня, который помещен в электромагнитное поле, создаваемое катушкой, через которую протекает переменный ток.

Деформация стержня будет происходить в соответствии с выражением (6.8). Как видно из рис. 6.4, за один период изменения магнитного поля

стержень изменит свои размеры дважды, т.е. колебательная система неполяризованной антенны имеет частоту колебаний в два раза выше частоты изменения магнитного поля.

Из выражения (6.8) видно, что деформация не зависит от знака интенсивности намагничивания.

**Поляризованная антенна.** Если колебательную систему антенны поместить в постоянное магнитное поле, на которое накладывается переменное магнитное поле, то картина будет совершенно иной (рис. 6.5). Через одну обмотку пропускается постоянный ток, который создает постоянное магнитное поле подмагничивания, а через другую – переменный ток, вызывающий деформацию пластин колебательной системы антенны. В этом случае выражение для деформации приобретает вид

$$\Delta_1 = a_1(I_n + I_-)^2 = a_1(I_n^2 + 2 I_n I_- + I_-^2). \quad (6.11)$$

Так как  $I_- \ll I_n$ ,  $I_-^2 \approx 0$ , равенство (6.11) приобретает вид

$$\Delta_1 = a_1(I_n + I_-)^2 = a_1(I_n^2 + 2 I_n I_-). \quad (6.12)$$

Как видно из полученного выражения, в рассматриваемом случае знак деформации будет зависеть от знака  $I_-$ .

Рис. 6.5 наглядно показывает, что при наличии подмагничивания частота колебаний антенны совпадает с частотой изменения магнитного поля.

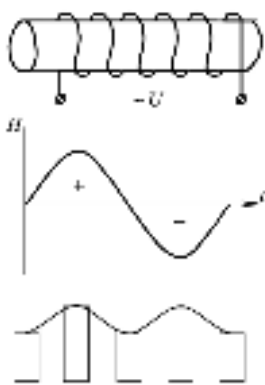


Рис. 6.4

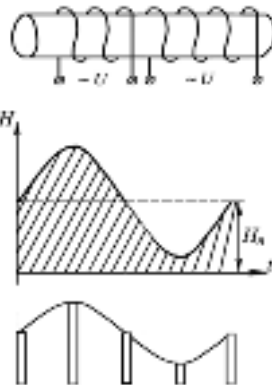


Рис. 6.5

### Контрольные вопросы

31. В акустической антенне, работающей на излучение, происходит следующие преобразования:

- электрической энергии в механическую энергию колебаний колебательной системы (см. пояснение 6);
- механической энергии колебаний колебательной системы в звуковую энергию (см. пояснение 19);
- звуковой энергии в механическую энергию колебаний колебательной системы (см. пояснение 31);
- механической энергии колебаний колебательной системы в электрическую энергию (см. пояснение 49).

32. По способу формирования направленности антенны бывают: рупорные, фокусирующие, интерференционные и параметрические. В рупорных антеннах направленность формируется следующим образом:

- за счет применения конического отражателя (см. пояснение 13);
- за счет создания специальной формы излучающей поверхности (см. пояснение 82);
- за счет суммирования звуковых волн, которые создаются каждой точкой излучающей поверхности (см. пояснение 111);
- за счет нелинейного взаимодействия звуковых волн большой амплитуды (см. пояснение 162).

33. В гидроакустических приборах используются пьезоэлектрические и магнитострикционные антенны. Пьезоэлектрические антенны могут работать следующим образом:

- только на прием звуковых волн (см. пояснение 140);
- только на излучение звуковых волн (см. пояснение 126);
- и на излучение и на прием звуковых волн (см. пояснение 112).

34. Частота собственных колебаний сердечника в виде стержня, закрепленного посредине, определяется выражением

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Нужную частоту можно получить за счет:

- изменения  $L$  (см. пояснение 86);
- изменения  $E$  (см. пояснение 143);
- изменения  $\rho$  (см. пояснение 2).

35. Антенна гидроакустического прибора может быть поляризованной или неполяризованной. Поляризованными бывают

- только магнитострикционные антенны (см. пояснение 81);

- только пьезоэлектрические (см. пояснение 62);
- и магнитострикционные и пьезоэлектрические (см. пояснение 40).

## Лекция 8

### 6.3. Направленное действие антенн

В современных гидроакустических приборах для определения расстояния до подводного объекта используется *эхо-метод*, который впервые был применен в 1804 г. академиком Я.Д. Захаровым. Поднявшись на воздушном шаре, ученый громко крикнул в рупор, направленный в сторону земли. По времени прихода отраженного от земли сигнала (эха) он рассчитал, что шар находился на высоте 1710 м от поверхности земли.

*Для какой же цели использовался рупор?* Конечно, для создания направленного излучения звука. Таким образом, простейшим устройством для обеспечения направленности излучения является отражатель. Кстати, при установке кольцевых антенн без прорези днища судна направленность излучения обеспечивается с помощью специального отражателя. Однако не всегда конструктивно удобно иметь такое сооружение, когда антенна устанавливается с прорезью в днище судна. Здесь без специальных обтекателей не обойтись. При этом возникает вопрос: *нельзя ли обеспечить направленное излучение другим способом?*

Найдем условие, при котором антенна будет обладать направленным действием, но сначала определим, что мы будем подразумевать под *направленным действием антенны*. Если вокруг излучателя наблюдается однородное звуковое поле, то такое излучение называется *ненаправленным*. Если же вокруг излучателя имеются направления, по которым наблюдаются максимумы и минимумы параметров звукового поля, то такое излучение называется *направленным*.

Предположим, что мы имеем плоский излучатель, у которого размер в направлении оси  $oy$  бесконечен, а в направлении оси  $ox$  – конечен и равен  $l$ . Разобьем этот излучатель на элементарные излучатели  $dx$  (рис. 6.6), количество которых будет пропорционально размеру  $l$ .

Выберем точку  $N$  на таком удалении от излучателя, чтобы лучи, идущие в эту точку от каждого из элементарных излучателей, можно было считать параллельными. На практике это фактически несколько длин волн.

Тогда звуковое давление в точке  $N$ , создаваемое отдельным элементарным излучателем, будет

$$dp_N = \frac{P_m}{l} \sin k(ct - r_2) dx. \quad (6.13)$$

Из рис. 6.6 видно, что

$$r_2 = r_1 + x \sin \gamma, \quad (6.14)$$

где  $x$  – координата элементарного источника;  $r_1$  – расстояние от первого элементарного источника до точки  $N$ ;  $\gamma$  – направление на точку  $N$ .

Тогда с учетом выражения (6.14) равенство (6.13) примет вид

$$dp_N = \frac{P_m}{l} \sin k[(ct - r_1) - x \sin \gamma] dx. \quad (6.15)$$

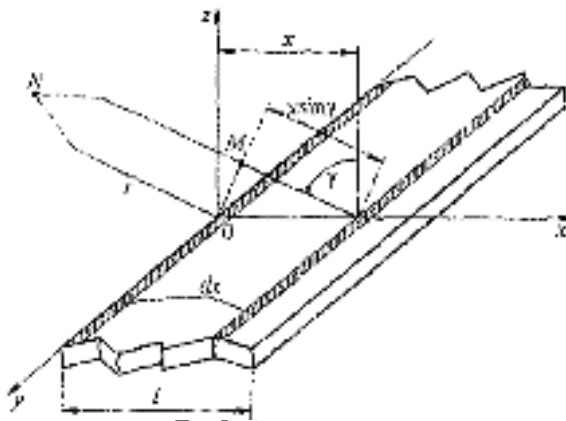


Рис. 6.6

Выражение (6.15) позволяет определить значение звукового давления, создаваемого в точке  $N$  любым из элементарных излучателей. Всего имеется  $l$  таких излучателей. Следовательно, для того, чтобы определить величину звукового давления в точке  $N$ , которое создается всеми элементарными излучателями, необходимо взять интеграл от равенства (6.15) в пределах от 0 до  $l$ , т.е.

$$p_N = \frac{P_m}{l} \int_0^l \sin k[(ct - r_1) - x \sin \gamma] dx. \quad (6.16)$$

Это табличный интеграл и его значение будет

$$p_N = \frac{P_m}{kl \sin \gamma} \cos[k(ct - r_1) - kx \sin \gamma] \Big|_0^l. \quad (6.17)$$

Подставляя в равенство (6.17) значение пределов, получим

$$p_N = \frac{P_m}{kl \sin \gamma} \{ \cos [k(ct - r_1) - kl \sin \gamma] - \cos k(ct - r_1) \}. \quad (6.18)$$

В фигурных скобках выражения (6.18) имеем разность косинусов, которая равна минус удвоенное произведение синуса полусуммы на синус полуразности. Учитывая при преобразованиях, что синус отрицательного аргумента равен минус синусу этого аргумента, окончательно имеем

$$p_N = \frac{2p_m}{kl \sin \gamma} \sin \frac{kl \sin \gamma}{2} \sin k \left[ (ct - r_1) - \frac{l \sin \gamma}{2} \right]. \quad (6.19)$$

Из выражения (6.19) видно, что в точке  $N$  наблюдается волна, звуковое давление которой изменяется по закону синуса, причем амплитуда давления также зависит по гармоническому закону от угла  $\gamma$ :

$$p(\gamma) = \frac{2p_m}{kl \sin \gamma} \sin \frac{kl \sin \gamma}{2}. \quad (6.20)$$

Это означает, что существуют направления, по которым наблюдаются максимумы и минимумы звукового давления. Для того, чтобы определить эти направления, необходимо исследовать равенство (6.20) на максимум и минимум.

1. Зададим  $\gamma = 0$ . Получим  $p(\gamma) = \frac{0}{0}$ , т.е. неопределенность типа  $\frac{0}{0}$ .

Раскроем её с помощью *правила Лопиталья*, т.е. возьмем производные отдельно от числителя и знаменателя. Получим

$$p(\gamma) = p_m \cos \frac{kl \sin \gamma}{2}. \quad (6.21)$$

Подставляя в выражение (6.21)  $\gamma = 0$ , получим

$$p_{(\gamma=0)} = p_m. \quad (6.22)$$

Из полученного равенства видно, что в направлении, перпендикулярном излучающей поверхности антенны, будет максимум звукового давления.

2. Определим направление, по которому  $p(\gamma) = 0$ . Для этого в равенство (6.20) необходимо подставить такое значение аргумента, чтобы в итоге числитель стал равным нулю, а знаменатель от нуля отличался, а именно

$$\frac{kl \sin \gamma}{2} = n\pi. \quad (6.23)$$



Отсюда с учетом того, что  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , имеем

$$\sin \gamma = n \frac{\lambda}{l}, \quad (6.24)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Из выражения (6.24) видно, что направлений, по которым имеет место минимум излучаемой энергии, может быть несколько.

Для главного лепестка диаграммы направленности ( $n = 1$ ) получим равенство

$$\sin \gamma = \frac{\lambda}{l}, \quad (6.25)$$

позволяющее рассчитать направленность плоского излучателя. Отсюда можно получить условие, при котором антенна будет обладать направленным действием:

$$l > \lambda. \quad (6.26)$$

Количество направлений, по которым  $p(\gamma) = 0$ , можно определить из следующего условия:

$$n = \frac{l}{\lambda}. \quad (6.27)$$

Таким образом, целое число отношения  $\frac{l}{\lambda}$  дает искомое количество направлений, по которым  $p(\gamma) = 0$ .

Для оценки направленности на практике пользуются такой характеристикой, как *фактор направленности*:

$$G^2 = \frac{I_\gamma}{I_{\gamma=0}}. \quad (6.28)$$

Наглядными являются диаграммы направленности в полярных координатах (рис. 6.7)

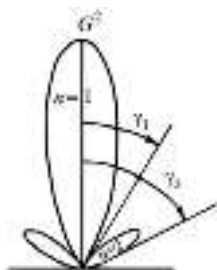


Рис. 6.7

## 6.4. Прием звуковых колебаний

Приемники звука подразделяются в зависимости от параметра звуковой волны, который измеряется. Так, например, бывают приемники звукового давления, градиента давления, колебательной скорости и др.

Наибольшее распространение получили приемники звукового давления, представляющие собой механическую колебательную систему, которая приводится в колебательное состояние механическими колебаниями среды. В приемнике происходит преобразование акустической энергии в механическую, а затем, в зависимости от принципа действия приемника, преобразование механической энергии в электрическую. Таким образом, на приемник действует акустическое давление, а на его выходе создается то или иное напряжение, характеризующее эффективность его работы.

На рис. 6.8 показан приемник звукового давления, который состоит из колебательной системы 1 и корпуса 2. Внутренняя полость антенны заполняется морской водой, чтобы выровнять статическое давление  $p_0$ .

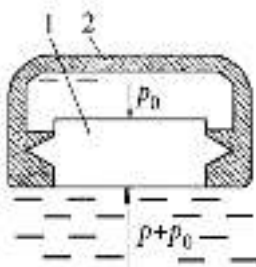


Рис. 6.8

Отношение электрического напряжения  $U$  на выходе приемника к акустическому давлению  $p$ , которое действует на его приемную поверхность, называется *чувствительностью приемника*:

$$\nu = \frac{U}{p}. \quad (6.29)$$

Единицей чувствительности является Вольт, делённый на Паскаль ( $\text{В} \cdot \text{Па}^{-1}$ ).

Обычно величина электрического напряжения на выходе приемника мала и его подключают к усилителю, являющемуся для приемника нагрузкой. Если сопротивление нагрузки очень большое,  $Z_n \rightarrow \infty$  (холостой ход), то напряжение на выходе приемника практически равно его ЭДС, т.е.  $U =$

Е. Если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению приемника ( $Z_n = Z_{вн}$ ), то развиваемое им напряжение будет  $U = 0,5 E$ . Таким образом, чувствительность приемника при работе на согласованную нагрузку в два раза меньше чувствительности холостого хода. Определение чувствительности приемника сводится к определению давления в той точке акустического поля, где расположен приемник.

Современная промышленность позволяет создать приемники сколь угодно высокой чувствительности. Однако использовать эту высокую чувствительность чаще всего не удастся из-за значительного уровня шумов. Существуют три основных источника шума: море, судно и сам прибор.

### 6.5. Линейная антенна

Предположим, что антенна состоит из двух точечных (направленных) преобразователей  $A_1$  и  $A_2$ , расположенных на концах базы длиной  $d$  (рис. 6.9 а). Если  $\gamma = 0$ , то фронт звуковой волны достигает точек  $A_1$  и  $A_2$  одновременно и оба выходных сигнала синфазны. Суммарный сигнал на выходе антенны в этом случае

$$E_{\Sigma \gamma=0} = 2E_m \sin \omega t.$$

Когда  $\gamma = \gamma_1$ , между сигналами появляется сдвиг по фазе

$$\psi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \gamma_1.$$

В результате имеем

$$E_1 = E_m \sin(\omega t + \psi); \quad E_2 = E_m \sin(\omega t - \psi),$$

где  $\psi = \frac{1}{2} \psi_1 = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma_1$ .

Значение суммарного сигнала

$$E_{\Sigma \gamma_1} = 2E_m \cos \psi \sin \omega t. \quad (6.29)$$

Характеристика направленности линейной антенны определится следующим образом:

$$G = \frac{E_{\Sigma \gamma_1}}{E_{\Sigma \gamma=0}} = \cos \psi. \quad (6.30)$$

Если база содержит  $m$  элементов, то формула (6.30) приобретает вид

$$G_m = \frac{\sin m\psi}{m \sin \psi}, \quad (6.31)$$

где  $\psi = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma$  – фазовая постоянная;  $d$  – расстояние между элементами.

Из выражения (6.31) следует, что первый минимум имеет место при  $m\psi = \pi$ .

Для этого направления  $\psi = \frac{\pi}{m} = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma_1$

или  $\sin \gamma_1 = \frac{\lambda}{md}$ . (6.32)

В реальных условиях каждый из элементов обладает собственной направленностью  $G_i$ , поэтому характеристика направленности всей системы будет

$$G_m = G_i G. \quad (6.33)$$

Регулировку направленности линейной антенны можно осуществить не только числом и рациональным размещением элементов, но и с помощью так называемых *цепей задержки*. В этом случае антенна называется *компенсированной* (рис. 6.9 а).

Предположим, что на выходе элемента  $A_1$  включена электрическая задержка  $\Delta\psi$  (рис. 6.9 б). Как отмечалось ранее, при наличии угла  $\gamma_1$  между электрическими сигналами возникает сдвиг по фазе

$$\psi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \gamma_1. \quad (6.34)$$

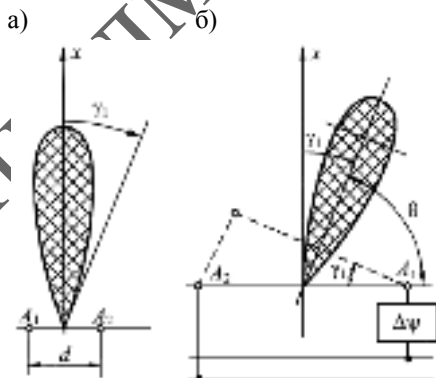


Рис. 6.9

Фаза любого гармонического колебания определяется выражением

$$\psi_0 = \omega t = \frac{2\pi c}{\lambda} t. \quad (6.35)$$

Если время  $t$  электрической задержки рассчитать по формуле

$$t = \frac{d}{c} \sin \gamma_1, \quad (6.36)$$

то сдвиг фазы выходного сигнала определится выражением

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \gamma_1. \quad (6.37)$$

Сравнивая выражения (6.34) и (6.37), убеждаемся в том, что наличие электрической задержки  $\Delta\psi$  обеспечивает полную компенсацию разности фаз между сигналами, которые снимаются с элементов  $A_1$  и  $A_2$ . Таким образом, введение задержки  $\Delta\psi$  равносильно повороту антенны на угол  $\gamma_1$ .

При работе элементов  $A_1$  и  $A_2$  в режиме излучения фазовая задержка  $\Delta\psi$  обеспечит подключение элемента  $A_1$  с некоторым запаздыванием по времени. В этом случае направление максимума излучаемой энергии определится равенством

$$\cos \theta = \frac{\Delta\psi \lambda}{2\pi d} \quad (6.38)$$

Характеристика направленности излучающей линейной антенны, как и прежде, в этом случае определяется выражением (6.31).

### Контрольные вопросы

36. Если вокруг источника звука наблюдается однородное звуковое поле, то такое излучение называется:

- направленным (см. пояснение 7);
- ненаправленным (см. пояснение 20).

37. Направление, по которому наблюдается максимум энергии, излучаемой направленной антенной, составляет с линией, перпендикулярной к плоскости излучателя, угол, равный:

- $0^\circ$  (см. пояснение 32);
- $30^\circ$  (см. пояснение 153);
- $45^\circ$  (см. пояснение 66);
- $90^\circ$  (см. пояснение 95).

38. Для определения направлений, по которым наблюдается минимум энергии, излучаемой направленной антенной, служит формула

$$\sin \gamma = n \frac{\lambda}{l}.$$

Какая из приведенных в ответах формул определяет ширину главного лепестка диаграммы направленности:

–  $\sin \gamma = \frac{\lambda}{l}$  (см. пояснение 99);

–  $\sin \gamma = \frac{2\lambda}{l}$  (см. пояснение 161);

–  $\sin \gamma = \frac{\lambda}{2l}$  (см. пояснение 147);

–  $\sin \gamma = \frac{l}{\lambda}$  (см. пояснение 129).

39. Используя формулу  $\sin \gamma = n \frac{\lambda}{l}$ , определите, при каком из приведенных условий (если  $n = 1$ ) антенна будет обладать направленным действием:

–  $\lambda > l$  (см. пояснение 160);

–  $\lambda < l$  (см. пояснение 145);

–  $0,5\lambda = l$  (см. пояснение 80).

40. Отношение электрического напряжения на выходе приемной антенны к акустическому давлению на ее входе называется:

– чувствительностью приемника (см. пояснение 61);

– разрешающей способностью приемника (см. пояснение 39).

## Лекция 9

### 7. АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИН

Одной из главных областей мирного применения гидроакустики является измерение глубин рек, морей и океанов, а также определение рельефа их дна. Для этих целей используется гидроакустический прибор, который измеряет вертикальное расстояние до какого-либо подводного объекта, называемый *эхолотом*, так как в нем реализуется так называемый *эхометод определения расстояния*. С помощью эхолота был обнаружен на дне Каспийского моря подводный хребет, который является продолжением складок Апшеронского полуострова, также с помощью этого прибора была измерена наибольшая глубина в Тихом океане и обнаружены контуры подводного хребта Ломоносова в Северном Ледовитом океане и Среднеатлантического хребта на дне Атлантики.

## 7.1. Принцип измерения глубины эхолотом

Пусть в точке  $A$  (рис. 7.1) расположен излучатель звуковых волн, а в точке  $B$  – приемник сигнала, отраженного от морского дна. Обозначим расстояние между антеннами (база антенн) через  $L_a$ . Тогда из прямоугольного треугольника  $OSA$  имеем

$$h^2 = \sqrt{(AO)^2 - \left(\frac{L_a}{2}\right)^2}, \quad (7.1)$$

где  $h$  – глубина под килем судна.

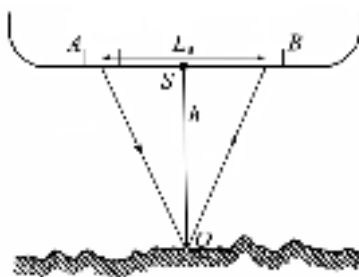


Рис. 7.1

Если скорость звука в воде равна  $c_0$ , а промежуток времени между моментами посылки звукового импульса и прихода эхо-сигнала к принимающей антенне равен  $t$ , то выражение (7.1) можно записать в виде

$$h = \frac{c_0 t}{2}. \quad (7.2)$$

Из выражений (7.1) и (7.2) видно, что задача определения глубины с помощью эхолота практически сводится к измерению весьма малого промежутка времени  $t$ .

Действительно, из равенства (7.2) имеем

$$t = \frac{2h}{c_0}. \quad (7.3)$$

Тогда для времени  $t$ , учитывая, что  $c_0 = 1500 \text{ м с}^{-1}$ , при измерении различных глубин получим данные, сведенные в таблицу:

$h$ , м	$t$ , с	$h$ , м	$t$ , с
10	0,013	750	1,0
100	0,13	1000	1,333
500	0,666	2000	2,666

Для измерения времени  $t$  в эхолотах используются следующие методы:

- вращающегося диска;
- вращающегося барабана;
- вращающегося пера;
- бесконечной ленты;
- электронно-лучевой трубки;
- импульсный (в цифровых индикаторах).

## 7.2. Основные параметры навигационного эхолота

Навигационный эхолот характеризуется следующими тактико-техническими параметрами:

- параметры импульсов;
- частота посылок импульсов;
- разрешающая способность по глубине;
- рабочая частота;
- направленность антенн.

**Параметры импульсов.** Большинство современных эхолотов работают в импульсном режиме. Импульсы различают по форме и длительности. Чаще всего применяются импульсы *прямоугольной* и *экспоненциальной* формы.

На рис. 7.2 приведены следующие виды импульсов: *a* – экспоненциальный (затухающий) импульс; *б* – прямоугольный (незатухающий) импульс).

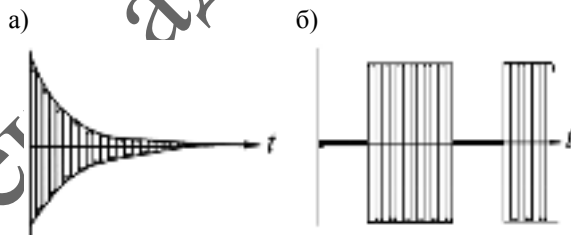


Рис. 7.2

Энергия прямоугольного импульса примерно в  $10^3$  раз больше энергии экспоненциального импульса такой же длительности.

Формирование экспоненциальных импульсов выполняется генератором ударного возбуждения, который состоит из резонансного контура и спускового устройства. Конструктивно это очень просто, но наличие



контура ограничивает длину кабеля между излучающей антенной и накопительным конденсатором, что, в некоторой степени, усложняет размещение приборов эхолота на судне.

Прямоугольные импульсы формируются специальными генераторами. Форма импульса оказывает значительное влияние на ширину  $\Delta f$  полосы пропускания частот приемного тракта. В случае экспоненциальной формы импульса величина  $\Delta f$  должна быть больше, чем при прямоугольном импульсе, что ухудшает защищенность приемного тракта от помех.

Длительность импульса  $\tau$  у современных эхолотов выбирается в пределах  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  с и определяется следующими условиями:

- интенсивность шума обратно пропорциональна  $\tau$ , поэтому, чем длиннее импульс, тем меньший уровень шума воспринимает приемник;
- энергия импульса пропорциональна  $\tau$ , поэтому с увеличением  $\tau$  возрастает дальность его распространения;
- чем короче импульс, тем выше порог возникновения кавитации;
- уменьшение  $\tau$  приводит к увеличению разрешающей способности эхолота по глубине.

**Частота посылок импульсов.** Частота посылок импульса зависит от диапазона измеряемых глубин. Так, например, при измерении глубин в диапазоне до 100 м, время, в течение которого сигнал на максимальной глубине (100 м) дойдет до грунта и вернется к приемнику, составит

$$t_{\max} = \frac{2h}{c_0} = \frac{200}{1500} = \frac{1}{450} \text{ мин.}$$

Отсюда частота следования импульсов составит  $\omega_n = 450$  имп./мин.

**Разрешающая способность эхолота по глубине.** Минимальное расстояние между двумя объектами, расположенными один за другим на звуковом луче, которое позволяет различать эти объекты как две разные цели, называется *разрешающей способностью эхолота по глубине*.

Вблизи от излучающей антенны разрешающая способность по глубине будет зависеть от уровня реверберации. Вне области действия реверберации определяющим фактором будет являться длина импульса  $S = c \cdot \tau$ .

На рис. 7.3 показано, что импульс, достигая дна, как бы «складывается» вдвое. При этом, если другой объект будет находиться внутри этого сложившегося импульса, то на индикаторе эхо-сигнал от этого объекта будет сливаться с сигналом от грунта. Если этот объект находится вне

сложившегося импульса, то он будет просматриваться как отдельная цель. Отсюда можно сделать вывод, что разрешающая способность эхолота по глубине определяется выражением

$$m_h = \frac{c\tau}{2}. \quad (7.4)$$

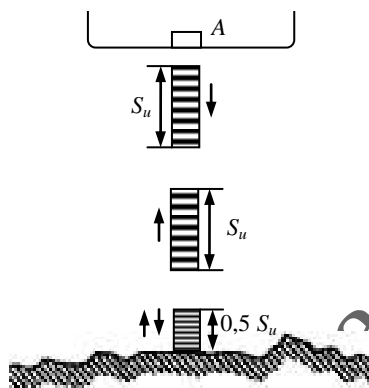


Рис. 7.3

**Рабочая частота.** Выбирается с учетом необходимости измерения определенных глубин. В соответствии с требованиями ИМО навигационный эхолот должен измерять глубины до 200 м.

**Направленность антенн.** Выбирается исходя из надежности работы эхолота в условиях качки.

### 7.3. Точность измерения глубин эхолотом

Погрешности измеренных эхолотом глубин можно разделить на инструментальные и методические.

*Инструментальные погрешности* обусловлены несовершенством конкретной конструкции или неправильной регулировкой прибора.

*Методические погрешности* зависят от внешних факторов или вытекают непосредственно из принципа действия эхолота. Основными методическими погрешностями эхолота являются:

$\delta h_c$  – погрешность из-за отклонения действительной скорости звука  $c$  от расчетной  $c_0=1500$  м/с;

$\delta h_e$  – погрешность из-за наклона морского дна;

$\delta h_{La}$  – погрешность из-за наличия базы антенн.

Определим значения поправок, которыми необходимо исправить показания эхолота в следующих случаях: если  $c \neq 1500$  м/с или морское дно имеет наклон, либо если есть база антенн.

**Поправка эхолота на отклонение скорости звука от расчетной.** Предположим, что база антенн отсутствует, т.е. излучающая и принимающая антенны совмещены. В этом случае истинная глубина под килем судна определяется выражением

$$h_{\text{ист}} = \frac{ct}{2}, \quad (7.5)$$

а глубина, измеренная эхолотом, – выражением

$$h_{\text{изм}} = \frac{c_0 t}{2}. \quad (7.6)$$

Тогда для поправки эхолота имеем

$$\Delta h_c = h_{\text{ист}} - h_{\text{изм}}. \quad (7.7)$$

Подставляя в равенство (7.7) выражения (7.5) и (7.6), после преобразований получим

$$\Delta h_c = h \left( \frac{c}{c_0} - 1 \right). \quad (7.8)$$

Учитывая, что скорость звука в море изменяется в пределах от 1440 до 1580 м/с, можно сделать вывод, что максимальная погрешность в показаниях эхолота не будет превышать значения  $\pm 5\%$ . В случае навигационного эхолота эту ошибку можно не принимать в расчет.

**Поправка эхолота на наклон морского дна.** Предположим, что антенны эхолота совмещены и морское дно имеет некоторый угол наклона  $\varepsilon$ .

Как видно из рис. 7.4, в случае, если угол наклона морского дна меньше половины ширины диаграммы направленности, эхолот измеряет не глубину под килем судна  $h_{\text{ист}}$ , а кратчайшее расстояние до грунта  $h_{\text{изм}}$ . Тогда для поправки эхолота на наклон морского дна имеем

$$\Delta h_\varepsilon = h_{\text{ист}} - h_{\text{изм}}. \quad (7.9)$$

Из треугольника  $ADC$  получим

$$h_{\text{ист}} = \frac{h_{\text{изм}}}{\cos \varepsilon} = h_{\text{изм}} \sec \varepsilon. \quad (7.10)$$

Подставляя равенство (7.10) в выражение (7.9), получим

$$\Delta h_{\varepsilon} = h_{\text{изм}} (\sec \varepsilon - 1). \quad (7.11)$$

Анализ выражения (7.11) показывает, что погрешность в измеренной глубине имеет существенное значение при наклоне морского дна более чем  $15^{\circ}$ . Почти 90 % шельфа имеет наклон дна не более  $5^{\circ}$ . Кроме того, эхолот выдает информацию, позволяющую считать себя ближе к опасности. Поэтому для навигационного эхолота и эта погрешность может не учитываться.

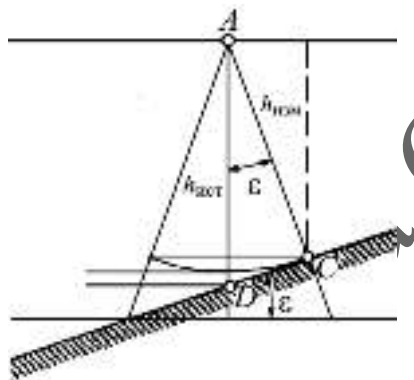


Рис. 7.4

**Поправка эхолота за базу антенн.** Как известно, схема эхолота реализуется следующее выражение:

$$h_{\text{изм}} = \frac{c_0 t}{2}. \quad (7.12)$$

Точное уравнение эхолота с учетом базы антенн имеет следующий вид:

$$h_{\text{изм}} = \sqrt{\left(\frac{c_0 t}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_a}{2}\right)^2}. \quad (7.12)$$

Тогда для поправки эхолота за базу антенн получим

$$\Delta h_{L_a} = h_{\text{изм}} \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{L_a}{2h_{\text{изм}}}\right)^2} - 1 \right]. \quad (7.13)$$

Анализ выражения (7.13) показывает, что рассматриваемая поправка всегда будет иметь знак «минус». Это означает, что эхолот дает завышенную глубину. Следовательно, при измерении малых глубин (менее

10 м) необходимо всегда показания эхолота исправлять поправкой за базу антенн. Поэтому, согласно правилам штурманской службы, рядом с указателем глубин должна находиться таблица поправок эхолота на малые глубины.

Если излучающая и передающая антенны совмещены, т.е. отсутствует база антенн, то, как видно из равенства (7.14),

$$\Delta h_{L_a} = 0.$$

### Контрольные вопросы

41. Расчетная скорость звука, используемая в отечественных эхолотах, составляет:

- 1000 м/с (см. пояснение 8);
- 1200 м/с (см. пояснение 21);
- 1500 м/с (см. пояснение 33);
- 2000 м/с (см. пояснение 51).

42. Зависит ли (да или нет) частота посылок импульсов от диапазона, в котором работает эхолот:

- да, зависит (см. пояснение 67);
- нет, не зависит (см. пояснение 98).

43. Разрешающая способность эхолота по глубине зависит от следующих факторов:

- длительности импульса (см. пояснение 159);
- рабочей частоты эхолота (см. пояснение 144);
- частоты посылок импульсов (см. пояснение 115).

44. Регулировкой эхолота можно уменьшить:

- методическую погрешность (см. пояснение 85);
- инструментальную погрешность (см. пояснение 79).

45. Поправка, которой исправляются показания эхолота в случае, когда действительное значение скорости звука в море отличается от расчетного, может иметь знак:

- только положительный (см. пояснение 60);
- только отрицательный (см. пояснение 38);
- как положительный, так и отрицательный (см. пояснение 65).

## 8. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ЛАГ

Принцип действия гидроакустического доплеровского лага основан на эффекте Доплера, который заключается в следующем: *если источник или приемник звука перемещаются относительно друг друга, то частота сигнала в приемнике будет отличаться от излучаемой частоты на величину, которая зависит от скорости относительного движения и называется доплеровским сдвигом частот.* Эти лаги относятся к классу абсолютных лагов, так как позволяют измерять скорость судна относительно морского дна.

При установке на судне и излучатель, и приемник доплеровского лага смонтированы на нем. Рассмотрим, каким образом в этом случае будет формироваться доплеровский сдвиг частоты. При этом необходимо иметь в виду, что все рассуждения касаются продольной составляющей скорости судна, т.е.  $V = V_x$ . Полученные результаты можно будет полностью распространить на поперечную составляющую скорости судна  $V_y$ .

### 8.1. Однолучевая схема лага

Предположим, что судно движется с продольной скоростью  $V$ , излучается сигнал, который распространяется вдоль звукового луча (рис. 8.1) под некоторым углом  $\theta$ . Тогда, на основании выражения (5.18), можно записать

$$\omega_* = ck - Vk \cos \theta_1 \quad (8.1)$$

или, вынося за скобки  $ck$ , получим

$$\omega_* = ck (1 - (V/c) \cos \theta_1). \quad (8.2)$$

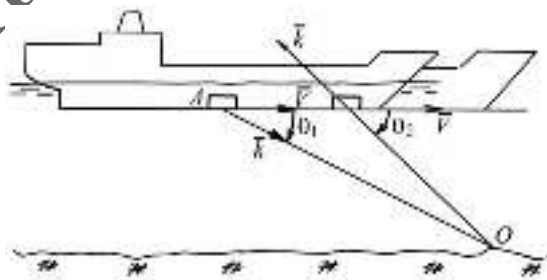


Рис. 8.1

Точка  $O$  на грунте является неподвижным приемником. Поэтому имеем, что  $ck = \omega_1$  – частота сигнала в приемнике, а  $\omega_* = \omega_0$  – частота излучаемого сигнала. Тогда с учетом этого запишем

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{1 - \frac{V \cos \theta_1}{c}}. \quad (8.3)$$

В точке  $O$  звуковой луч отражается, не изменяя частоты, и идет в приемник. Следовательно, точку  $O$  можно рассматривать как неподвижный излучатель. Тогда частоту  $\omega_2$  в приемнике можно определить также по формуле (8.1), с учетом того, что теперь  $\omega_* = \omega_2$ . В результате получим

$$\omega_2 = \omega_1 \left( 1 + \frac{V \cos \theta_2}{c} \right) \quad (8.4)$$

или с учетом равенства (8.3)

$$\omega_2 = \omega_0 \frac{1 + \frac{V \cos \theta_2}{c}}{1 - \frac{V \cos \theta_1}{c}} \quad (8.5)$$

Для транспортного судна  $V \ll c$ , поэтому  $\theta_1 \approx \theta_2 = \theta$ . Тогда выражение (8.5) примет вид

$$\omega_2 = \omega_0 \left( 1 + \frac{V \cos \theta}{c} \right) \left( 1 - \frac{V \cos \theta}{c} \right)^{-1} \quad (8.6)$$

или с учетом того, что  $\omega = 2\pi f$ ,

$$f_2 = f_0 \left( 1 + \frac{V \cos \theta}{c} \right) \left( 1 - \frac{V \cos \theta}{c} \right)^{-1}. \quad (8.7)$$

Так как  $\frac{V \cos \theta}{c} \ll 1$ , второй множитель в выражении (8.7) можно разложить в степенной ряд. Тогда, ограничиваясь членами второго порядка малости, после несложных преобразований имеем

$$f_2 = f_0 \left( 1 + \frac{2V \cos \theta}{c} + \frac{2V^2 \cos^2 \theta}{c^2} + \dots \right) \quad (8.8)$$

или

$$f_{\text{д}} = \frac{2Vf_0}{c} \cos \theta \left( 1 + \frac{V}{c} \cos \theta \right), \quad (8.9)$$

где  $f_{\text{д}} = f_2 - f_1$  – доплеровский сдвиг частоты.

Из выражения (8.9) видно, что, в принципе, зависимость доплеровского сдвига частоты от скорости судна носит нелинейный характер. Это является одним из основных недостатков однолучевой схемы. Для современного транспортного судна, с учетом того, что  $c \gg V$ , с достаточной степенью точности можно принять

$$f_{\text{ДЛ}} = \frac{2V}{c} f_0 \cos \theta, \quad (8.10)$$

где  $f_{\text{ДЛ}}$  – значение лагового доплеровского сдвига частоты, полученное без учета нелинейной составляющей.

Из равенства (8.12) имеем

$$V = \frac{f_{\text{ДЛ}}}{2f_0} c \sec \theta \quad (8.11)$$

или 
$$V \approx \frac{f_{\text{ДЛ}}}{2f_0} c \sec \theta. \quad (8.12)$$

Выражение (8.11) называется *уравнением однолучевого лага*. Необходимо отметить, что использование упрощенной линейной зависимости приводит к возникновению погрешности в показаниях лага.

Относительную погрешность лага можно определить с помощью выражения

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta f_{\text{ДЛ}}}{f_{\text{ДЛ}}}, \quad (8.13)$$

В равенстве (8.13) значение  $\Delta f_{\text{ДЛ}}$  определяется выражением

$$\Delta f_{\text{ДЛ}} = f_{\text{ДЛ}} - f_{\text{ДЛ}}'. \quad (8.14)$$

Подставляя в равенство (8.13) значения соответствующих величин из выражений (8.9), (8.10) и (8.14), после преобразований получим

$$\delta V = -\frac{V \cos \theta}{c}. \quad (8.15)$$

Анализ этого выражения показывает, что лаг, установленный на судне, скорость которого равна 20 уз, при  $\theta = 60^\circ$  будет иметь погрешность порядка 0,3 %, что не может считаться приемлемым для высокоточного абсолютного лага.

Сложнее обстоит дело с погрешностями, которые возникают у однолучевого лага при наличии у судна дифферента или крена (при измерении поперечной составляющей скорости судна).



На основании рис. 8.2 можно записать

$$\begin{aligned} \Delta f_d &= f_{\text{ДЛ}} - f_d = \frac{2Vf_0}{c} \cos(\theta - \psi) - \frac{2Vf_0}{c} \cos \theta = \\ &= \frac{2Vf_0}{c} (\cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi - \cos \theta). \end{aligned} \quad (8.16)$$

В реальных условиях угол  $\psi$  мал, поэтому, принимая  $\cos \psi \approx 1$ ,  $\sin \psi \approx \psi$ , из равенства (8.16) получим

$$\Delta f_d = \frac{2Vf_0}{c} \psi \sin \theta. \quad (8.17)$$

Тогда, по аналогии с выражением (8.13), получим

$$\Delta V = \frac{2Vf_0 c \psi \sin \theta}{2Vf_0 c \cos \theta} = \psi \operatorname{tg} \theta. \quad (8.18)$$

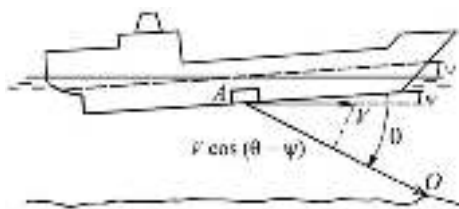


Рис. 8.2

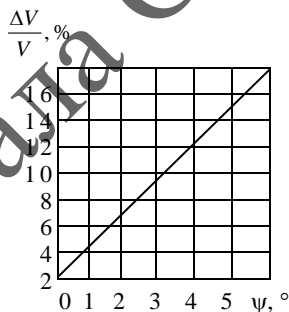


Рис. 8.3

График зависимости погрешности лага от дифферента судна приведен на рис. 8.3, из которого видно, что погрешности имеют неприемлемую величину с позиций требований точности судовождения. Поэтому однолучевые схемы не нашли применения, хотя они по конструкции проще.

## 8.2. Двухлучевые лаги

Эффективным способом снижения влияния на точность показаний лага нелинейной зависимости между доплеровским сдвигом частоты и скоростью судна является использование двухлучевой антенной системы, так называемой *схемы Янус* (рис. 8.4). В этой схеме сигналы излучаются вдоль диаметральной плоскости судна в сторону носа и кормы под одним и тем же углом  $\theta$ .

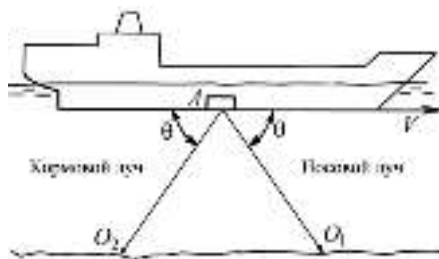


Рис. 8.4

В этом случае для доплеровского сдвига частоты по носовому и кормовому лучу будем иметь соответственно:

$$f_{\text{ДН}} = \frac{2V}{c} f_0 \cos \theta + \frac{2V^2}{c^2} f_0 \cos^2 \theta; \quad (8.19)$$

$$f_{\text{ДК}} = -\frac{2V}{c} f_0 \cos \theta + \frac{2V^2}{c^2} f_0 \cos^2 \theta; \quad (8.20)$$

Разностная доплеровская частота составит

$$f_{\text{д}} = f_{\text{ДН}} - f_{\text{ДК}}; \quad (8.21)$$

Подставляя в равенство (8.21) выражения (8.19) и (8.20), получим

$$f_{\text{д}} = \frac{4V}{c} f_0 \cos \theta. \quad (8.22)$$

Отсюда уравнение двухлучевого лага будет

$$V = \frac{f_{\text{д}}}{4f_0} c \sec \theta. \quad (8.23)$$

При определении погрешности лага по схеме (8.13) в степенном разложении, входящем в формулы (8.19) и (8.20), необходимо сохранить кубические члены. Тогда для относительной погрешности двухлучевого лага, возникающей из-за неучета нелинейности, имеем

$$\delta V = \frac{V^2}{c^2} \cos^2 \theta. \quad (8.24)$$

Для судна, имеющего скорость  $V = 20$  уз, при  $\theta = 60^\circ$  получим  $\delta V = 0,001\%$ . Таким образом, при использовании схемы Янус с высокой степенью точности обеспечивается линейная связь между доплеровским сдвигом частоты и скоростью судна.

Анализ погрешности двухлучевого лага при наличии дифферента судна по методике, используемой для однолучевого лага, позволяет получить следующее выражение:

$$\delta V = \cos \psi - 1 \approx -\frac{\psi}{2}. \quad (8.25)$$

Знак минус в равенстве (8.25) говорит о том, что при любом знаке дифферента показания двухлучевого лага будут занижены. Сравнение выражения (8.25) с равенством (8.18) указывает на большое преимущество двухлучевой схемы.

### 8.3. Многолучевые лаги

Одно- и двухлучевые схемы лага позволяют измерить только продольную составляющую скорости судна. Для того, чтобы получить информацию о полном векторе скорости судна, необходимо обеспечить измерение как продольной, так и поперечной составляющих скорости судна. Такая схема может быть реализована в двух вариантах. Рассмотрим их подробнее.

*Диаметрально-траверзная схема лучей* (рис. 8.5). В этой схеме одна пара лучей ориентирована вдоль диаметральной плоскости (ДП) судна и обеспечивает измерение продольной составляющей скорости судна, другая – в плоскости, перпендикулярной ДП (левый – правый борт), что позволяет измерить поперечную составляющую.

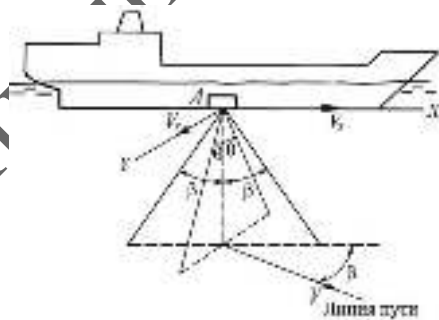


Рис. 8.5

На основании выражения (8.23) имеем:

$$V_x = \frac{f_{\Delta 1}}{4f_0} c \sec \theta; \quad (8.26)$$

$$V_y = \frac{f_{д2}}{4f_0} c \sec \theta, \quad (8.27)$$

где  $f_{д1} = f_{дн} - f_{дк}; f_{д2} = f_{дпб} - f_{длб}$ .

С помощью выражений (8.26) и (8.27) можно получить значение полной скорости  $V$  и угла сноса  $\beta$ :

$$V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}; \quad (8.28)$$

$$\beta = \arctg \frac{V_y}{V_x}. \quad (8.29)$$

**X-образная схема лучей** (рис. 8.6). В этой схеме лучи смещены относительно ДП на угол  $\gamma$ .

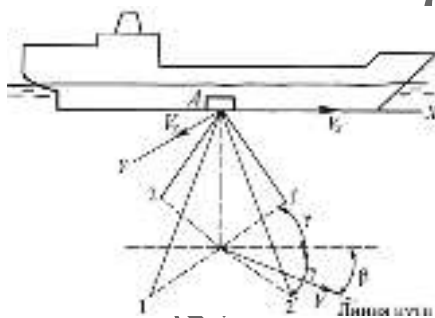


Рис. 8.6

Исходя из равенства (8.22), получим:

– для пары лучей 1 – 1'

$$f_{д1} = \frac{4f_0}{c} (V_x \cos \theta \cos \gamma - V_y \cos \theta \sin \gamma); \quad (8.30)$$

– для пары лучей 2 – 2'

$$f_{д2} = \frac{4f_0}{c} (V_x \cos \theta \cos \gamma + V_y \cos \theta \sin \gamma). \quad (8.31)$$

Решая совместно уравнения (8.30) и (8.31), найдем

$$V_x = \frac{(f_{д1} - f_{д2})}{8f_0 \cos \gamma} \sec \theta; \quad (8.32)$$

$$V_y = \frac{(f_{д1} + f_{д2})}{8f_0 \cos \gamma} \sec \theta. \quad (8.33)$$

Используя выражения (8.32) и (8.33), можно легко определить значение полной скорости  $V$  и угла сноса  $\beta$ .

Необходимо отметить, что данная задача может быть решена и на основе трехлучевой схемы, однако при этом несколько усложняется вычислительный процесс, но упрощается конструкция лага.

Если необходимо иметь дополнительную информацию для обеспечения безопасной швартовки судна, используются шести- или восьмилучевые схемы.

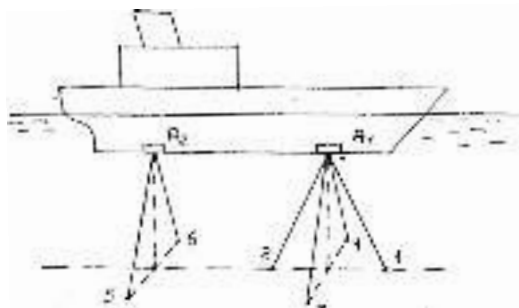


Рис. 8.7

На рис. 8.7 приведена шестилучевая схема. Два дополнительных луча в кормовой части судна позволяют измерить поперечную составляющую скорости судна в точке  $A_2$ . Имея аналогичное измерение скорости в точке  $A_1$  и зная расстояние между точками  $A_1$  и  $A_2$ , можно рассчитать линейную скорость перемещения конечностей судна, а также угловую скорость поворота судна вокруг вертикальной оси.

Восьмилучевая схема представляет собой фактически два четырехлучевых лага, которые установлены в носовой и кормовой части судна. При швартовке судна работают оба лага, а в открытом море – один из них.

#### 8.4. Погрешности доплеровского лага

Среди наиболее значимых методических погрешностей доплеровского лага необходимо отметить погрешность из-за отклонения скорости звука в воде от расчетной и флюктуационную погрешность.

**Влияние непостоянства скорости звука в воде.** Как известно, скорость звука в море может изменяться в пределах  $\pm 5\%$  от расчетного значения  $1500 \text{ м с}^{-1}$ , которое закладывается в вычислитель лага. Как видно из уравнения лага (8.11), из-за этого могут возникать недопустимо боль-

шие погрешности и необходимо принимать меры для их уменьшения. При этом необходимо иметь в виду, что и теоретически, и экспериментально было установлено, что на величину доплеровского сдвига частоты влияет скорость звука только в районе расположения антенн. Физическая сущность этого факта объясняется тем, что все изменения скорости звука, имеющиеся на трассе, взаимно компенсируются при прямом и обратном ходе луча.

В современных доплеровских лагах используются следующие методы компенсации возникающей погрешности.

1. Метод, основанный на непосредственном измерении скорости звука вблизи антенны с помощью специальных устройств – *скоростемеров*.

2. Косвенный метод определения скорости звука на основе расчета по эмпирическим формулам, в частности, по формуле Вильсона, наиболее часто используемой для этих целей:

$$c = 1449,2 + 4,623 t - 0,0546 t^2 + 1,39(S - 35), \quad (8.34)$$

где  $t$  – температура воды, °C;

$S$  – соленость воды, ‰.

3. Метод, который заключается в обеспечении постоянного значения скорости звука за счет стабилизации температуры жидкости, омывающей антенну, расположенную в герметичной камере. В качестве жидкости обычно используются технические масла, стабилизацию температуры обеспечивает обычный нагреватель и термоконтакт, настроенный на определенную температуру.

4. Метод, непосредственно вытекающий из уравнения лага (8.11) и заключающийся в том, что нестабильность скорости звука компенсируется за счет синхронного изменения частоты излучаемого сигнала  $f_0$ , причем измеритель скорости звука в этом случае выступает в качестве регулятора указанной частоты.

5. Метод, который является в техническом отношении наиболее передовым и заключается в стабилизации отношения  $c/\cos \theta$  при неизменной частоте  $f_0$ . Реализован в результате создания частотно независимых (в доплеровском смысле) антенн, которые представляют собой линейные решетки, состоящие из отдельных преобразователей, обладающих слабой направленностью. Питание каждого преобразователя осуществляется с некоторым сдвигом по фазе  $\Delta\psi$ .

На основании выражения (6.38) имеем

$$\cos \theta = \frac{\Delta \psi \lambda}{2\pi d} = \frac{\Delta \psi c}{2\pi d f_0}. \quad (8.35)$$

Если выбрать  $d = \lambda_0 = c_0/f_0$ ,  $c_0 = 1500$  м/с, то при  $\theta_0 = 60^\circ$  ( $\cos 60^\circ = 0,5$ ) сдвиг по фазе составит

$$\Delta \psi = \frac{2\pi d f_0 \cos \theta_0}{c} = \frac{2\pi f_0 c \cdot 0,5}{c f_0} = \pi.$$

Подставляя полученное значение  $\Delta \psi$  в выражение (8.35), получим

$$\cos \theta = \frac{c}{2d f_0}. \quad (8.36)$$

Равенство (8.36) определяет, как будет изменяться угол  $\theta$  при изменении скорости звука в районе антенны, если  $d = \text{const}$  и  $f_0 = \text{const}$ .

Подставляя (8.36) в уравнение лага (8.12), получим

$$V = \frac{f_d c}{2f_0 \cos \theta} = \frac{f_d c \cdot 2d f_0}{2f_0 c} = d f_d. \quad (8.37)$$

Выражение (8.37) показывает, что применение частотно-независимой антенны позволяет исключить влияние скорости звука в воде на показания лага.

**Флюктуационная погрешность.** Для пояснения сущности этой погрешности необходимо иметь в виду, что излучаемый антенной лага луч имеет конечную ширину, а не является бесконечно узким, как предполагалось ранее. В результате этого доплеровский сигнал, в результате диффузного отражения от морского дна обладает ограниченным шумоподобным спектром частот. Следовательно, в приемную антенну приходит сигнал, который представляет собой сумму большого числа независимых сигналов, имеющих случайную фазу и различный доплеровский сдвиг частот, т.е. определяется не одной принятой частотой, а некоторым доплеровским спектром.

Центральная часть этого спектра соответствует доплеровскому сдвигу частот. Ширину доплеровского спектра частот приближенно можно найти как разность доплеровских сдвигов частот для направлений, ограничивающих доплеровский луч ( $\theta + \Delta\theta$ ) и ( $\theta - \Delta\theta$ ). Имеем

$$\Delta f = \frac{2f_0 V}{c} \Delta\theta \sin \theta_0 \quad (8.38)$$

или с учетом равенства (8.10)

$$\Delta f = f_{ДП} \Delta\theta \text{tg} \theta_0. \quad (8.39)$$

Для относительной ширины доплеровского спектра можно записать

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{ДП}}} = \Delta \theta \text{tg} \theta_0. \quad (8.40)$$

Принимая, что  $\theta_0 = 60^\circ$  и  $\Delta \theta = 3 \dots 5^\circ$ , найдем, что относительная ширина доплеровского спектра составляет примерно 10 ... 17 %, что является сравнительно узкой полосой. Следовательно, задача измерения скорости судна заключается в определении средней частоты доплеровского спектра.

Эффективным способом уменьшения флюктуационной погрешности является ее сглаживание путем усреднения результатов измерений в течение некоторого периода времени. Причем, чем продолжительнее время осреднения, тем точнее будет определено значение доплеровской частоты, а тем самым и скорость судна.

Однако выбор времени осреднения происходит на основе компромисса между желанием увеличить точность показаний лага и приемлемым временем запаздывания в получении информации о скорости. Так, например, в открытом море величина времени осреднения может составлять 150 ... 300 с и тогда точность измерения скорости будет высокой, так как флюктуационная погрешность составит 0,005 ... 0,1 %. При плавании в узкостях это время не должно превышать 15 с, а при швартовке – не более 1,5 с.

Для получения высокой точности при малом времени осреднения необходимо использовать более высокие частоты излучаемого сигнала, порядка 1 ... 2 МГц.

## 8.5. Основные параметры доплеровского лага

К основным параметрам доплеровского лага можно отнести следующие: число и ориентацию лучей, угол наклона лучей, частоту излучаемого сигнала, ширину диаграммы направленности, характер излучения.

**Число и ориентация лучей.** Количество и ориентация лучей антенн доплеровского лага зависят от задач, решаемых лагом. Для измерения только продольной составляющей скорости судна достаточно иметь антенну с двумя лучами. Четырехлучевая антенна позволяет измерять вектор путевой скорости относительно грунта и определять угол сноса судна. Если необходимо иметь информацию о движении судна (включая движение его оконечностей) в процессе швартовки, то используется система антенн, обеспечивающих излучение шести или даже восьми лучей.



Как известно, ориентация акустических лучей бывает диаметрально-траверзной,  $X$ - и  $Y$ -образной. В лагах с импульсным режимом работы диаметрально-траверзную схему по сравнению с  $X$ -образной используют значительно реже. Иначе обстоит дело в лагах с непрерывным излучением. В этом случае в целях борьбы с паразитными сигналами, являющимися результатом прямой наводки из излучающего тракта в приемный, приходится вводить в приемный тракт режекторный фильтр, настроенный на частоту излучаемого сигнала. В связи с этим отраженные сигналы, имеющие малые по величине доплеровские сдвиги частоты, оказываются в полосе режекции фильтра и не пропускаются им. Применение в данном случае диаметрально-траверзной схемы приводит к тому, что она будет обладать плохой чувствительностью к поперечной составляющей скорости судна, которая, как правило, мала по величине, т.е. такой лаг становится нечувствительным к углам сноса судна. При использовании  $X$ -образной схемы ориентации лучей этот недостаток отсутствует, так как на направление каждого луча проектируются и продольная и поперечная составляющие скорости судна.

Следует указать на еще одно преимущество  $X$ -образной ориентации. В этом варианте, в отличие от диаметрально-траверзного, возможно вычисление (при несколько измененном алгоритме расчета) полного объема информации о движении судна при отсутствии одного луча, причем без потери точности. В этом смысле можно говорить о большей навигационной надежности  $X$ -образной схемы.

**Угол наклона лучей.** Выбор оптимального угла наклона лучей в вертикальной плоскости осложняется несколькими противоречивыми факторами. С одной стороны, как это следует из равенства (8.22), чем угол  $\theta$  меньше, тем больше доплеровский сдвиг частоты при прочих равных условиях. С другой стороны, увеличение угла  $\theta$  приводит к снижению чувствительности лага, так как на каждый узел приращения скорости будет меньше величина приращения доплеровской частоты. Наконец, из формулы (8.39) следует, что чем больше угол  $\theta$ , тем больше ширина доплеровского спектра сигнала, а это означает увеличение флюктуационной погрешности при неизменном времени усреднения. Все изложенные ранее противоречивые соображения привели к тому, что в современных доплеровских гидроакустических лагах величина угла  $\theta$  находится в пределах от  $45$  до  $60^\circ$ . Наибольшее распространение получили лаги, в которых наклон лучей составляет  $60^\circ$ .

**Частота излучаемого сигнала.** Выбор частоты излучения доплеровского гидроакустического лага определяют в основном следующие два фактора:

- при уменьшении частоты увеличивается предельная рабочая глубина, на которой обеспечивается функционирование лага;
- при увеличении частоты уменьшается основная флюктуационная погрешность лага.

В зависимости от поставленной цели превалирует один из двух факторов.

**Ширина диаграммы направленности.** Выбор оптимального раствора характеристики направленности также зависит от разных факторов. С позиций точности измерения скорости судна, особенно с точки зрения необходимости снижения флюктуационной погрешности, желательно уменьшение ширины диаграммы направленности. Однако для реализации малых значений  $\Delta\theta$  требуется значительное увеличение габаритов антенн. Кроме того, при малых  $\Delta\theta$  возникают трудности навигационного характера в связи с возможностью потери акустического контакта с грунтом при качке судна или при выполнении циркуляции.

В современных лагах ширина диаграммы направленности колеблется в пределах от  $3^\circ$  до  $6^\circ$ .

**Характер излучения сигнала.** По характеру излучения сигнала лаги бывают с непрерывным, импульсным и комбинированным излучением (непрерывное – на малых глубинах, импульсное – на больших).

Непрерывное излучение позволяет с более высокой точностью измерять скорость судна. При этом схема обработки сигналов отличается простотой. Однако такой режим работы имеет серьезные недостатки. Главный из них заключается в том, что из-за объемной реверберации он может использоваться на глубинах до 100 м. Кроме того, необходимо иметь раздельные антенны для излучения и приема сигналов, которые к тому же должны устанавливаться таким образом, чтобы исключалось их взаимное влияние. В современных доплеровских лагах режим непрерывного излучения применяется, как правило, в комбинированных схемах при плавании на малых глубинах или при швартовке, когда требуется измерять малые скорости с высокой точностью.

В лагах, предназначенных для работы на глубинах более 100 м, используется импульсный режим, который позволяет вести борьбу с помехой

от объемной реверберации на основе временной селекции полученного сигнала. Результат указанной селекции заключается в том, что с момента излучения сигнала и до прихода отраженного от морского дна импульса приемный тракт заблокирован (закрыт) и поэтому все вредные сигналы, являющиеся результатом объемной реверберации и приходящие раньше полезного сигнала, в приемник не попадают.

Существенное значение имеет также использование в приемном тракте схемы временной автоматической регулировки усиления, которая обеспечивает прохождение лишь тех сигналов, которые превышают заданный уровень, что позволяет эффективно бороться с реверберационной помехой.

Использование импульсного режима позволяет дополнительно достигнуть трех целей:

- радикально решить вопрос об исключении прямого влияния сигнала излучения на приемный тракт;
- возможность применения одной антенны, попеременно работающей на излучение и прием сигналов;
- реализовать еще один (эхолотный) режим работы лага (современные доплеровские лаги с импульсным режимом работы одновременно являются и высокоточными эхолотами).

Импульсный режим работы, при котором используется одна антенна, позволяет исключить и те негативные последствия, проистекающие из эффекта параллакса, которые неизбежны при использовании двух пространственно-разнесенных антенн.

Недостаток лагов с импульсным режимом работы состоит в ограничении минимальной глубины функционирования, особенно при малых скоростях судна. Это объясняется тем, что при короткой длительности излучаемых импульсов, которые приходится использовать на малых глубинах, резко ухудшается точность измерения скорости вследствие расширения спектра доплеровского сигнала.

### **Контрольные вопросы**

46. Направление излучаемого сигнала в доплеровском лаге:

- вертикально вниз (см. пояснение 9);
- в горизонтальной плоскости (см. пояснение 22);
- под некоторым углом к горизонту (см. пояснение 34).

47. Однолучевой доплеровский лаг измеряет

- продольную составляющую скорости судна (см. пояснение 52);
  - поперечную составляющую скорости судна (см. пояснение 68)
  - скорость перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна (см. пояснение 97);
  - вертикальную составляющую скорости судна (см. пояснение 1).
48. Двухлучевой доплеровский лаг измеряет
- продольную составляющую скорости судна (см. пояснение 14);
  - поперечную составляющую скорости судна (см. пояснение 101)
  - скорость перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна (см. пояснение 128);
  - вертикальную составляющую скорости судна (см. пояснение 117).
49. Четырехлучевой доплеровский лаг измеряет
- продольную составляющую скорости судна (см. пояснение 26);
  - поперечную составляющую скорости судна (см. пояснение 114);
  - скорость перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна (см. пояснение 84);
  - вертикальную составляющую скорости судна (см. пояснение 78).
50. Шестилучевой доплеровский лаг измеряет
- продольную составляющую скорости судна (см. пояснение 70);
  - поперечную составляющую скорости судна (см. пояснение 37);
  - скорость перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна (см. пояснение 18);
  - вертикальную составляющую скорости судна (см. пояснение 109).

### *Лекция 11*

## **9. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЛАГИ**

### **9.1. Принцип действия лага**

Принцип действия корреляционного лага основан на измерении времени между одинаковыми по характеристикам сигналами, которые отразились от грунта и поступили в две антенны, разнесенные вдоль диаметральной плоскости (ДП) судна.

Рассмотрим подробнее этот принцип для случая измерения продольной составляющей скорости судна. Пусть в ДП судна (рис. 9.1) установлены три разнесенные по длине судна антенны. Излучающая антенна 3 расположена точно посередине между двумя принимающими антеннами 1 и 2.

Предположим, что характеристики диаграмм направленности всех трех антенн идентичны, они взаимно перекрываются и их оси ориентированы вертикально вниз.

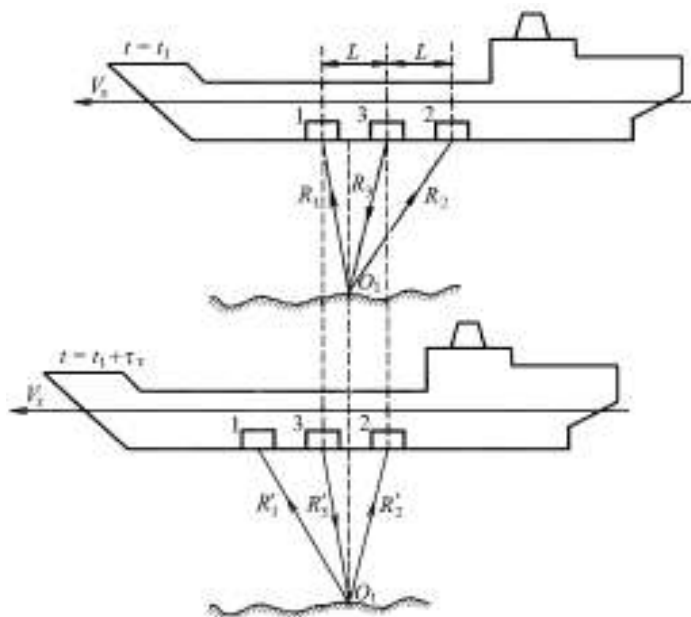


Рис. 9.1

Поверхность морского дна, как известно, представляет собой совокупность большого числа элементарных отражателей, расположенных случайным образом. Пусть излучающая антенна 3 в момент времени  $t = t_1$  облучает на дне в числе прочих и элементарный отражатель  $O_1$ . Эхо-сигнал от отражателя  $O_1$  принимается антеннами 1 и 2. Амплитуда и фаза сигнала, принятого антенной 1, определяется геометрией лучей  $R_3$  и  $R_1$ .

Продолжая свое движение, судно в какое-то время  $t = t_1 + \tau$  окажется в таком положении, что излучающая антенна 3 займет то место, которое в момент времени  $t_1$  занимала антенна 1. Очевидно, что геометрия лучей  $R_3$  и  $R'_2$  аналогична геометрии лучей  $R_3$  и  $R_1$ , за исключением направления распространения акустической волны. Однако изменение направления распространения сигнала не приводит к изменению его амплитуды и фазы. Приведенные рассуждения можно повторить для любого  $n$ -го отражателя, находящегося в пределах озвученного пятна на морском дне.

В результате можно сформулировать следующее важное положение: каким бы ни был суммарный сигнал, принятый кормовой антенной 3 в момент времени  $t = t_1 + \tau_r$ , он повторит суммарный сигнал, принятый носовой антенной 1 в момент времени  $t = t_1$ , так как его формирует та же совокупность сигналов тех же элементарных отражателей. Существенным является и то обстоятельство, что указанное повторение произойдет с отставанием по времени  $\tau_r$ , которое называется *транспортным (временным) сдвигом*. Величина  $\tau_r$  определяется по формуле

$$\tau_r = L / V_x, \quad (9.1)$$

т.е.  $\tau_r$  равно времени, которое требуется судну, имеющему скорость  $V_x$ , для прохождения половины расстояния между приемными антеннами.

Таким образом, задача определений скорости судна  $V_x$  сводится к определению временного сдвига  $\tau_r$  между сигналами, принятыми разнесенными антеннами при известном расстоянии  $L$ , т.е.

$$V_x = L / \tau_r. \quad (9.2)$$

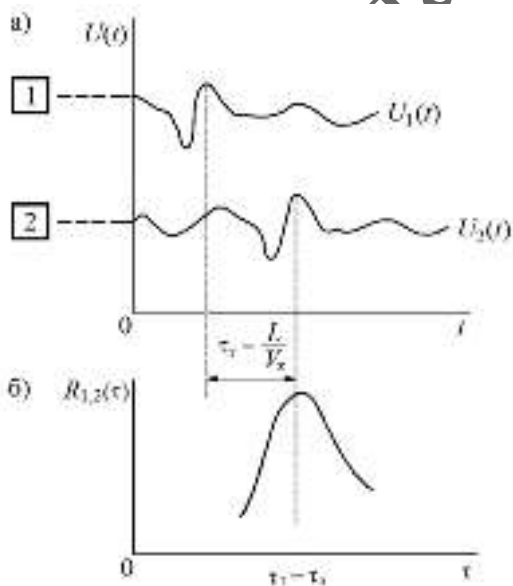


Рис. 9.2

Развернутая во времени вследствие движения судна общая картина будет выглядеть как повторение по форме со сдвигом  $\tau_r$  некоторых функций  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , представляющих собой сигналы, принятые антеннами 1 и 3,

причем указанные сигналы носят характер стационарных случайных функций (рис. 9.2 а). По этой причине задачу следует решать на основе анализа степени корреляционной связи между двумя указанными сигналами.

Способ определения времени  $\tau_T$  базируется на свойстве автокорреляционной функции принимать максимальные значения, если выполняется условие равенства огибающих сигналов, принятых носовой и кормовой антеннами.

Для выполнения этого условия в тракт сигнала, принимаемого носовой антенной, вводится задержка по времени  $\tau_3$ , которая может автоматически изменять свою величину.

Таким образом, если в процессе изменения величины  $\tau_3$  достигается максимум (рис. 9.2 б) автокорреляционной функции, то это означает, что выполняется равенство

$$\tau_3 = \tau_T. \quad (9.3)$$

В случае, когда у судна отсутствует снос, выражение для коэффициента взаимной корреляции огибающих сигналов, принятых разнесенными антеннами, имеет вид

$$\rho_{1,2}(\tau) = e^{-2\pi \left[ \frac{\Delta G^2 \tau_0^2}{c^2} (L - V_x \tau_3)^2 \right]}. \quad (9.4)$$

Из формулы (9.4) следует, что при  $\tau_3 = \tau_T = L/V_x$

$$\rho_{1,2}(\tau) = e_0 = 1.$$

Следовательно, в тот момент времени, когда коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{1,2}(\tau) = 1$ , имеет место равенство

$$L - V_x \tau_3 = 0,$$

откуда получим

$$V_x = L/\tau_3. \quad (9.5)$$

## 9.2. Корреляционный лаг с интерполяционным методом обработки сигнала

Корреляционный лаг, в силу заложенного и него принципа действия, обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что измерения скоростей, близких или равных нулю, практически невозможно, так как величина транспортной задержки  $\tau_T$  при этом стремится к бесконечности. По этой причине либо необходимо устанавливать минимально допустимое значение измеряемых скоростей, либо переходить к другому методу обработки сигнала.

Практическое применение нашел так называемый *интерполяционный метод обработки*, суть которого заключается в следующем. Пусть в некоторый момент времени носовая приемная антенна 1 (рис. 9.3), после излучения антенной 3, измерила сигнал  $U_1$  (дискретное значение). Одновременно кормовая приемная антенна 2 выполнила измерение сигнала  $U_2$ . В результате измерений  $U_1$  и  $U_2$ , выполненных носовой и кормовой антеннами, неизвестная пространственная функция  $v = f(x)$  или адекватная ей функция времени  $U = f(t)$  будет реализована двумя точками:  $A$  и  $B$ .

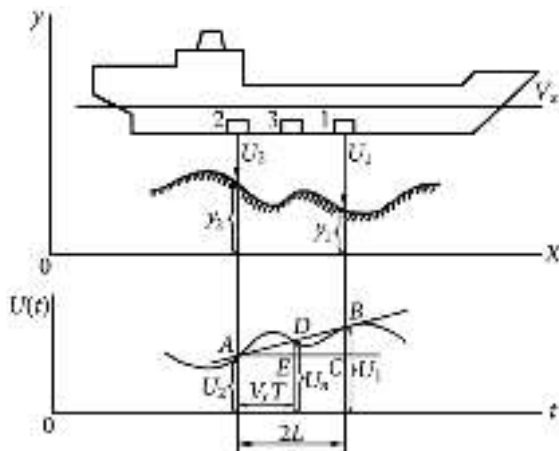


Рис. 9.3

Исходя из предположения, что функция  $y = f(x)$  гладкая и непрерывная и функция  $U = f(t)$  идентична ей в указанном смысле, через две упомянутые ранее точки можно провести интерполяционную прямую  $AB$ , которая в первом приближении отображает функцию  $U = f(t)$ . Затем на кормовой приемной антенне 2 с интервалом времени  $\Delta t_i$  производятся дискретные измерения сигнала  $U_i$ , и когда значение очередного сигнала  $U_n$  окажется на интерполяционной прямой  $AB$  (точка  $D$  на рис. 9.3), фиксируется время

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (9.6)$$

За время  $T$  судно смещается на расстояние, равное произведению  $V_x T$ . Построив два треугольника:  $ADE$  и  $ABC$ , которые являются подобными, найдем следующие соотношения:



$$\frac{BC}{2L} = \frac{DE}{V_x NT}$$

или

$$\frac{U_1 - U_2}{2L} = \frac{U_n - U_2}{V_x T}. \quad (9.7)$$

Из равенства (9.7) легко определить скорость судна

$$V_x = \frac{2L(U_n - U_2)}{T(U_1 - U_2)}. \quad (9.8)$$

Таким образом, для определения величины скорости  $V_x$  не потребовалось проходить все расстояние  $2L$ . Следовательно, измерение скорости можно осуществить даже при очень медленном движении судна, причем достаточно быстро по времени. Из формулы (9.7), в частности, вытекает, что если  $U_n = U_2$ , то  $V_x = 0$ , а если  $U_n < U_2$ , то  $V_x < 1$ .

На основе изложенного материала можно сделать вывод, что основная методическая погрешность интерполяционного метода определения скорости заключается в мере несовпадения интерполяционной прямой  $AB$  с функцией  $U = f(t)$ .

### 9.3. Основные параметры лага

Гидроакустические корреляционные лаги характеризуются определенными техническими параметрами, к которым можно отнести следующие: режим излучения, число приемников и их расположение на судне, частота излучаемого сигнала, ширина диаграммы направленности.

**Режим излучения.** В корреляционном лаге можно использовать любой режим – непрерывный или импульсный. Однако, как и в доплеровском гидроакустическом лаге, режим непрерывного излучения имеет ограничение по глубине (не более 100 м), так как в этом случае возникают значительные трудности по снижению влияния объемной реверберации звука. В импульсном режиме излучения эта проблема решается лучше, потому что реверберационные помехи значительно снижаются и обеспечивается развязка приемного и излучающего трактов. Кроме того, в импульсном режиме появляется возможность измерения глубины моря под килем судна, т.е. совмещение функции лага и эхолота. По этой причине практическое применение нашли корреляционные лаги, работающие в импульсном режиме.

Выбор длительности импульса производится из следующих соображений. С одной стороны, длительность импульса должна быть больше времени транспортного запаздывания при всех скоростях судна, которые подлежат измерению. Как отмечалось ранее, величина  $\tau_{и}$  связана со скоростью судна  $V_x$  соотношением (9.1). Поэтому необходимо выполнить следующее неравенство:

$$\tau_{и} > \frac{L}{V_x}. \quad (9.9)$$

С другой стороны, длительность импульса нужно иметь меньше того промежутка времени, который необходим для распространения сигнала до дна и возвращения эхо-сигнала, т.е. требуется выполнить еще одно неравенство

$$\tau_{и} > \frac{2H}{c}, \quad (9.10)$$

где  $H$  – глубина моря под килем судна.

Таким образом, длительность импульса должна находиться в следующем интервале:

$$\frac{2H}{c} > \tau_{и} > \frac{L}{V_x}. \quad (9.11)$$

Переходя в пределе к равенствам, получим следующее условие, выполнение которого является необходимым для обеспечения работоспособности лага:

$$\frac{2H}{c} = \frac{L}{V_x}. \quad (9.12)$$

Выражение (9.12) дает возможность, основываясь на величине рабочей глубины лага  $H$  и значении предельной минимальной скорости судна  $V_{\min}$ , подлежащей измерению, найти расстояние  $2L$  между центрами приемных антенн корреляционного лага. Отметим также, что формула (9.5) позволяет, исходя из текущих значений  $V_x$  и  $H$ , автоматически выбирать оптимальную длительность импульса.

Целенаправленно используя сигналы объемной реверберации, можно с помощью корреляционного лага измерять и относительную скорость судна, что обычно и предусмотрено в конструкции лага либо одновременно с измерением абсолютной скорости, либо автоматически, как только потерял контакт с морским дном. При этом в автоматическом режиме

периодически делаются попытки вновь перейти на режим измерения скорости судна относительно грунта.

**Число приемников и их расположение на судне.** Число приемников зависит от задач, решаемых лагом. Так, если необходимо измерить только продольную составляющую скорости судна  $V_x$ , то достаточно иметь два приемника, размещенные вдоль диаметральной плоскости судна.

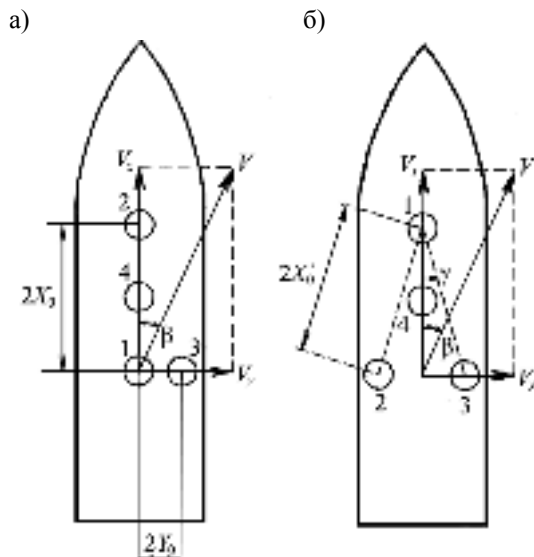


Рис. 9.4

Для определения полного вектора скорости судна  $V$  и угла сноса  $\beta$  необходимо установить, как минимум, три принимающих устройства. Здесь возможны два варианта. На рис. 9.4 а показан первый вариант, где 1, 2, 3 – принимающие антенны, а 4 – излучающая. При известных расстояниях между приемными антеннами  $2X_0$  и  $2Y_0$  и измеренных величинах временных задержек  $\tau_{1,2}$  и  $\tau_{1,3}$  (между сигналами, принятыми соответствующими антеннами) определение путевой скорости и угла сноса сводится к вычислениям по следующим формулам:

$$V = \frac{X_0 \cos \beta}{\tau_{1,2}}; \tag{9.13}$$

$$\beta = \arctg \frac{X_0 \tau_{1,3}}{Y_0 \tau_{1,2}}. \tag{9.14}$$

Другой возможный вариант размещения приемников показан на рис. 9.4 б. В этом случае временные задержки, соответствующие максимумам взаимной корреляции сигналов, определяются следующими выражениями:

$$\tau_{1,2} = \frac{X_0 \cos(\gamma - \beta)}{V \cos \beta} . \quad (9.15)$$

$$\tau_{1,3} = \frac{X_0 \cos(\gamma + \beta)}{V \cos \beta} , \quad (9.16)$$

где  $X_0$  и  $Y_0$  — известные параметры, характеризующие размещение антенн. Решая совместно уравнения (9.15) и (9.16), после ряда алгебраических выкладок, получим искомые выражения:

$$V = \frac{2X_0 \sin \gamma}{\tau_{1,2} - \tau_{1,3}} ; \quad (9.17)$$

$$\beta = \arctg \frac{\tau_{1,2} - \tau_{1,3}}{(\tau_{1,2} + \tau_{1,3}) \operatorname{tg} \gamma} . \quad (9.18)$$

**Частота излучаемого сигнала и ширина диаграммы направленности.** Из выражения (9.4) следует, что чем шире диаграмма направленности  $\Delta\theta$  и больше частота излучаемого сигнала  $f_0$ , тем острее максимум взаимокорреляционной функции, что позволяет точнее определять искомое время  $\tau_z = \tau_T$ , а значит, и точнее вычислять скорость судна. Однако применение более широкой диаграммы имеет и негативные последствия, так как приводит к уменьшению коэффициента концентрации антенны, что требует увеличения мощности излучения для обеспечения нормальной работы лага на заданных глубинах.

Повышение частоты излучения  $f$  также имеет отрицательную сторону, выражающуюся в возрастании коэффициента поглощения, что, в конечном счете, ведет к снижению рабочей глубины. В результате компромиссного решения наиболее часто встречающимися величинами обсуждаемых параметров являются  $\Delta\theta = 30^\circ$  и  $f_0 = 150$  кГц.

Значительным достижением можно считать появление двухчастотных корреляционных лагов, в которых одновременно по излучаемой низкой частоте определяется абсолютная скорость судна (по сигналам, отраженным от грунта), а по высокой частоте (единицы мегагерц) — относительная скорость (по сигналам объемной реверберации).

## 9.4. Погрешности измерения скорости

Измерение скорости судна корреляционным лагом производится с некоторыми погрешностями, условно подразделяющимися на *методические* и *инструментальные*.

Рассмотрим основные методические погрешности этого лага.

**Флюктуационная погрешность.** В п. 8.4 была рассмотрена главная методическая погрешность доплеровского гидроакустического лага, так называемая *флюктуационная погрешность измерения скорости*, и было показано, что единственной эффективной мерой снижения ее величины является усреднение результатов измерения по времени  $T_0$ , которое обеспечивает снижение указанной погрешности.

Сравнение по этому показателю корреляционного лага с доплеровским, поскольку природа флюктуационной погрешности в обоих лагах одинакова, позволяет сделать вывод, что значительное различие в запаздывании информации о скорости (почти в 20 раз) для достижения равной точности не имеет значения при плавании в открытом море. Однако такое запаздывание становится заметным при маневрировании в узкостях, делается весьма существенным при постановке на якорь и оказывается неприемлемым при информационном обеспечении швартовки, откуда вытекает, что по данному признаку корреляционный лаг уступает доплеровскому.

**Погрешность от сноса, крена и дифферента судна.** Рассмотрим погрешности однокомпонентного корреляционного лага, возникающие при движении судна, вследствие существования у него некоторых углов сноса, крена и дифферента.

Если судно движется по линии пути, характеризуемой углом сноса  $\beta$  по отношению к линии диаметральной плоскости судна, то максимум корреляционной функции возникает при перемещении судна не на расчетное расстояние  $L$ , а на величину проекции этого расстояния на линию пути, которое обозначим  $L_\beta$ , т.е.

$$L_\beta = L \cos \beta. \quad (9.19)$$

Истинное значение скорости в этом случае будет

$$V_{\text{н}} = \frac{L \cos \beta}{\tau_{\text{T}}}. \quad (9.20)$$

Лаговую скорость можно рассчитать, используя выражение

$$V_n = \frac{L}{\tau_T}. \quad (9.21)$$

Абсолютная погрешность лага будет определяться формулой

$$\Delta V_\beta = V_n - V_u = V_n \left( 1 - \frac{V_u}{V_n} \right). \quad (9.22)$$

Подставляя сюда значения  $V_u$  и  $V_n$ , в соответствии с выражениями (9.20) и (9.21), окончательно получим

$$\Delta V_\beta = V_n (1 - \cos \beta). \quad (9.23)$$

С помощью аналогичных рассуждений можно получить формулу для погрешности лага в случае движения судна при наличии углов сноса и дифферента  $\psi$ :

$$\Delta V_{\beta\psi} = V (1 - \cos \beta \cos \psi) \quad (9.24)$$

и в случае движения судна при наличии углов сноса и крена  $\chi$ :

$$\Delta V_{\beta\chi} = V (1 - \cos \beta) \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \beta \cos^2 \chi}. \quad (9.25)$$

## 10. ИНДУКЦИОННЫЕ ЛАГИ

### 10.1. Основы теории лага

Принцип действия индукционного лага основан на законе электромагнитной индукции

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (10.1)$$

где  $e$  – ЭДС, возникающая в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии;  $\Phi = B \cdot S$  – магнитный поток, создаваемый электромагнитом ( $B$  – магнитная индукция;  $S$  – площадь сечения магнитного потока).

В общем случае выражение (10.1) можно записать в виде

$$e = - \frac{d(BS)}{dt} = - \left( S \frac{dB}{dt} + B \frac{dS}{dt} \right), \quad (10.2)$$

где  $dS$  представляет собой площадь, «протраливаемую» проводником  $l$  за время  $dt$ . Величина  $dS$ , очевидно, определяется произведением

$$dS = B l v. \quad (10.3)$$

В современных индукционных лагах используется датчик (индукционный преобразователь (ИП)) с электромагнитом 2 (рис. 10.1),

обмотка которого питается переменным током с частотой 50 Гц ( $\sim U$ ). Электромагнит создает переменное магнитное поле, движущееся вместе с судном относительно воды. Магнитная индукция этого поля определяется выражением

$$B = B_{\max} \sin \omega t, \quad (10.4)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота (50 Гц).

Подставляя равенства (10.3) и (10.4) в формулу (10.2), получим

$$e = -B_{\max} S \omega \cos \omega t - B_{\max} l v \sin \omega t. \quad (10.5)$$

Выражение (10.5) определяет величину ЭДС, которая наводится в морской воде между электродами  $l$ .

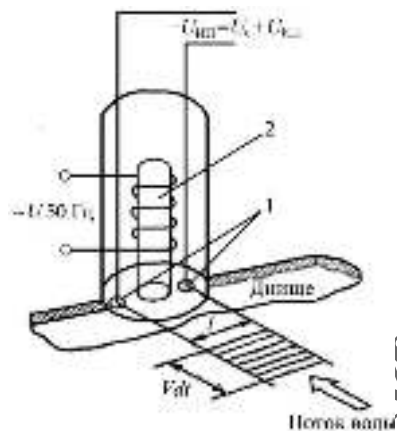


Рис. 10.1

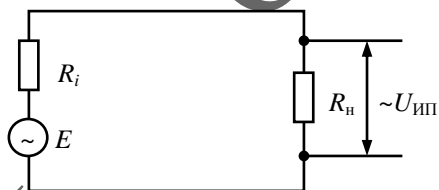


Рис. 10.2

На рис. 10.2 приведена эквивалентная схема ИП, включенного на нагрузку  $R_n$ . Такой нагрузкой является входное сопротивление схемы обработки сигнала индукционного преобразователя. Символом  $R_i$  обозначено сопротивление морской воды между электродами.

Падение напряжения на нагрузке  $R_n$  определится следующим равенством:

$$U_{\text{ИП}} = \frac{e R_n}{R_n + R_i}. \quad (10.6)$$

Экспериментальные исследования показали, что сопротивление  $R_i$  зависит в основном от солености воды. Для того чтобы исключить влияние

солености и температуры морской воды на показания лага, входное сопротивление измерительной схемы лага выбирают исходя из неравенства  $R_n \gg R_i$ . В этом случае из выражения (10.6) с учетом (10.5) получим

$$U_{\text{ИП}} = -B_{\text{max}} S \cos \omega t - B_{\text{max}} IV \sin \omega t. \quad (10.7)$$

Равенство (10.7) показывает, что сигнал, который снимается с индукционного преобразователя, состоит из двух частей:

$$U_{\text{ИП}} = U_{\text{к}} + U_{\text{с}}, \quad (10.8)$$

где  $U_{\text{к}}$  — помеха, которая называется *квадратурной*, так как она сдвинута по фазе на  $\pi/2$  по отношению к полезному сигналу;  $U_{\text{с}}$  — полезный сигнал, зависящий от скорости судна.

Сигнал  $U_{\text{ИП}}$  снимается с электродов 1 (см. рис. 10.1) и передается в электрическую схему лага для преобразования его в отсчет скорости судна. При преобразовании напряжения  $U_{\text{ИП}}$  квадратурная помеха отделяется от полезного сигнала и исключается. Таким образом, индукционный лаг измеряет скорость  $V$  судна относительно воды.

На рис. 10.3 приведена функциональная схема, поясняющая принцип преобразования сигналов в современном индукционном лаге ЛИ-2.

Снимаемое с датчика сигнала ДС напряжение  $U_{\text{ИП}}$ , содержащее полезный сигнал и помехи, подается на предварительный усилитель УС, который находится внутри прибора ИП. Усиленный сигнал по кабелю подается в центральный прибор (вычислитель аналого-цифровой (ВАЦ)), установленный в ходовой рубке.

Основным устройством прибора ВАЦ является узел интегратора и вычислителя, в котором подавляется квадратурная помеха и производится преобразование сигналов аналоговой формы в цифровую. Кроме того, в этом узле осуществляется коррекция сигнала скорости, т.е. ввод постоянной, линейной и нелинейной поправок. Для этой цели имеются специальные корректоры, работа которых определяется заранее составляемой программой.

Узел выработки дополнительных сигналов предназначен для формирования информации о скорости и пройденном расстоянии и выдачи этих данных в систему судовой автоматики. Информация о скорости выдается в цифровом виде – в виде числоимпульсного кода (код  $V$ ) и в аналоговой форме – в виде напряжений переменного тока, пропорциональных скорости судна  $\sim U_V = U_V$ . Информация о пройденном расстоянии выдается в ви-



де последовательности импульсов (200 и 500 имп./миля). Для навигационных целей к прибору ВАЦ подключается репитер скорости (РС) и репитер скорости и пути (РСП).

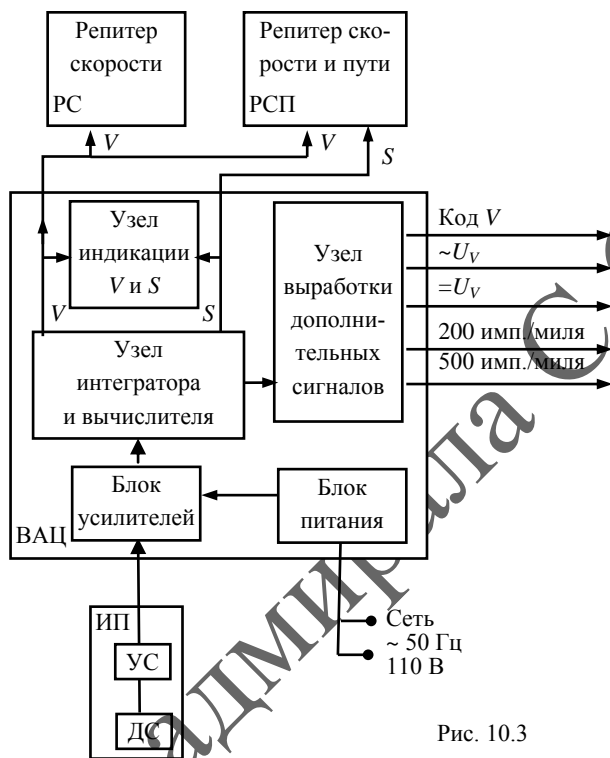


Рис. 10.3

## 10.2. Погрешность измерения скорости индукционным лагом

Точность показаний лага в большой степени зависит от места установки индукционного преобразователя. Это объясняется, прежде всего, возникновением вблизи поверхности корпуса движущегося судна турбулентного слоя воды, имеющего неодинаковую толщину и случайное поле скоростей частиц жидкости. Кроме того, распределение магнитной индукции  $B$  в объеме воды неодинаково по длине судна и носит весьма сложный характер, не поддающийся аналитическому исследованию. Эти и другие случайные факторы приводят к тому, что измеренная лагом скорость не соответствует истинной скорости судна, причем связь между этими скоростями имеет нелинейный характер.

Таким образом, индукционный лаг имеет погрешность, которая должна быть компенсирована поправкой  $\Delta V$ . В общем случае поправка лага является некоторой функцией скорости судна

$$\Delta V = f(V).$$

Эту функцию можно представить в виде суммы трех составляющих (рис. 10.4):

$$\Delta V = a + bV + c(V), \quad (10.9)$$

где  $a$  – постоянная;  $bV$  – линейная;  $c(V)$  – нелинейная составляющие поправки.

Постоянная составляющая поправки лага вводится по время регулировки прибора в порту или в море при нулевой скорости и штилевой погоде. После выполнения такой регулировки поправка лага имеет линейную и нелинейную составляющие.

Определение и ввод линейной составляющей поправки лага выполняют по результатам испытания лага на мерной линии. Сущность этой операции состоит в следующем. Как известно, в индукционном лаге отсчет скорости судна пропорционален полезному сигналу индукционного преобразователя:

$$V_{\text{и}} = mU_{\text{с}}. \quad (10.10)$$

Исходя из того, что эта функция линейна, погрешность лага, имеющая линейный характер, может компенсироваться посредством изменения коэффициента пропорциональности  $m$ . Задача состоит в том, чтобы получить новый отсчет, соответствующий истинному значению скорости, при прежнем значении сигнала  $U_{\text{с}}$ :

$$V_{\text{и}} = V_{\text{и}} + \Delta V = m_1 U_{\text{с}}, \quad (10.11)$$

где  $\Delta V$  – поправка лага, определяемая на мерной линии (на полном ходу судна).

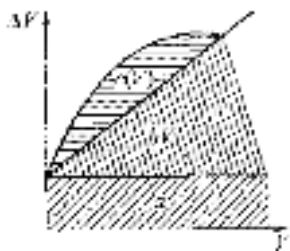


Рис. 10.4

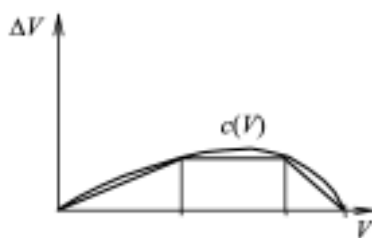


Рис. 10.5

Таким образом, ввод линейной составляющей поправки лага связан с изменением крутизны характеристики лага, определяемой выражением (10.10).

После выполнения этой регулировки в показаниях лага останется только нелинейная составляющая погрешности, зависимость которой от скорости приведена на рис. 10.5. Нелинейная составляющая поправки лага вводится с помощью корректора. Данные для установки корректора определяют при испытании лага на мерной линии.

Сущность этой операции заключается в том, что кривая аппроксимируется прямыми линиями. При этом весь диапазон скоростей разбивается на участки. Далее корректору задают такую программу работы, при которой на первом участке крутизна характеристики лага увеличивается по сравнению с исходной. На втором участке крутизну характеристики устанавливают равной исходной. На третьем участке требуется уменьшить крутизну характеристики лага. При такой работе корректора погрешность лага во всем диапазоне скоростей снижается до минимума.

Описанную регулировку лага необходимо проводить ежегодно, так как вследствие обрастания корпуса судна изменение поправки лага в течение года может достигать до 2,5 %.

### **Контрольные вопросы**

51. Принцип действия корреляционного лага основан на измерении следующих показателей:

- частоты (см. пояснение 10);
- времени (см. пояснение 23);
- фазы (см. пояснение 35).

52. Интерполяционный метод обработки сигнала в корреляционном лаге позволяет повысить точность измерения следующих величин:

- малой скорости (см. пояснение 53);
- любой скорости (см. пояснение 76);
- максимальной скорости (см. пояснение 127).

53. Точность измерения скорости корреляционным лагом при увеличении ширины диаграммы направленности излучения

- снижается (см. пояснение 116);
- увеличивается (см. пояснение 113);
- остается неизменной (см. пояснение 96).

54. В основе принципа действия индукционного лага находятся:

- эффект Доплера (см. пояснение 83);
- закон Ома (см. пояснение 77);
- закон Фарадея (см. пояснение 58).

55. Поправка индукционного лага состоит из постоянной, линейной и нелинейной составляющих. При стоянке в порту можно уменьшить следующие величины:

- постоянную составляющую (см. пояснение 36);
- линейную составляющую (см. пояснение 25);
- нелинейную составляющую (см. пояснение 11).

### Контрольная работа

1. Какие процессы наблюдаются при распространении звуковой волны в водной среде:

- а) колебание частиц воды относительно положения равновесия;
- б) перенос частиц воды звуковой волной;
- в) изменение давления;
- г) изменение плотности.

2. В твердых телах можно возбудить следующие процессы:

- а) продольную звуковую волну;
- б) поперечную звуковую волну;
- в) диагональную звуковую волну;
- г) сложную звуковую волну.

3. Какую связь характеризует уравнение колебательного движения

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{p}{\rho_0};$$

а) между колебательным движением частиц и изменением плотности среды;

б) между колебательным движением частиц и изменением давления;

в) между изменением плотности среды и изменением давления.

4. Где происходят процессы, описываемые волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \varphi + \frac{4}{3\rho_0} \eta_1 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi);$$

а) в вязкой жидкости;

б) в идеальной жидкости.

5. В выражении для закона изменения звукового давления:

$$p = p_m e^{-\alpha x} \sin k(ct - x),$$

частотой сигнала являются:

- а)  $\alpha x$ ;
- б)  $kx$ ;
- в)  $kc$ .

6. Формула Стокса  $I = I_0 e^{-\alpha x}$  определяет интенсивность:

- а) звуковой волны любой формы;
- б) сферической звуковой волны;
- в) цилиндрической звуковой волны;
- г) плоской звуковой волны.

7. В выражение для коэффициента поглощения звука  $\beta = 0,036 f^{3/2}$

частоту  $f$  необходимо подставлять в следующих единицах

- а) в Гц;
- б) в кГц;
- в) в МГц.

8. Для расчета коэффициента поглощения звука имеется эмпирическая формула  $\beta = 0,00414 f^{3/2}$ . Рассчитанный по этой формуле коэффициент  $\beta$  имеет размерность

- а) дБ·км<sup>-1</sup>;
- б) Нп·м<sup>-1</sup>;
- в) Нп·км<sup>-1</sup>;
- г) дБ·м<sup>-1</sup>.

9. В выражение для расчета дальности распространения плоской звуковой волны в вязкой жидкости  $x_{\max} = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_{\min}}{I_0}\right)$  необходимо подставлять коэффициент  $\beta$ , рассчитанный по формуле:

- а)  $\beta = 0,036 f^{3/2}$ ;
- б)  $\beta = 0,00414 f^{3/2}$ .

10. Произведение  $\rho c$  называется

- а) удельным акустическим сопротивлением среды;
- б) адиабатическим коэффициентом сжимаемости жидкости;
- в) коэффициентом динамической вязкости жидкости.

11. Закон преломления звука имеет следующий вид:

а)  $\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_r} = \frac{c_1}{c_2}$ ;

б)  $\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2}$ ;

в)  $\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2}$ .

12. Величина, которая показывает, какая часть энергии проходит через границу раздела сред, называется *коэффициентом*:

- а) отражения;
- б) преломления.

13. Рефракцией называется

- а) способность звуковых волн огибать препятствия;
- б) способность звуковых волн суммироваться;
- в) изменение траектории движения звуковой волны.

14. В стоячей звуковой волне амплитуда колебательной скорости:

- а) такая же, как и в бегущей волне;
- б) величина постоянная;
- в) изменяется по гармоническому закону.

15. В акустической антенне, работающей на прием, происходит преобразование

- а) электрической энергии в механическую энергию колебательной системы;
- б) механической энергии колебательной системы в звуковую энергию;
- в) звуковой энергии в электрическую энергию.

16. Если вокруг источника звука имеют место направления, по которым наблюдаются максимумы и минимумы параметра звуковой волны (например, давления), то такое излучение называется

- а) направленным;
- б) ненаправленным.

17. В линейной антенне направление излучения меняется за счет

- а) изменения частоты излучаемого сигнала  $f$ ;
- б) введения фазовой задержки  $\Delta\psi$ .

18. Влияет ли (да или нет) угол наклона лучей доплеровского лага на величину флюктуационной погрешности:

- а) да;
- б) нет.

19. Влияет ли (да или нет) глубина под килем судна на выбор длительности импульса корреляционного лага?

- а) да;
- б) нет.

20. Поправка индукционного лага состоит из трех составляющих: постоянной, линейной и нелинейной. По результатам пробегов на мерной линии компенсируется:

- а) постоянная составляющая поправки;
- б) линейная составляющая поправки;
- в) нелинейная составляющая поправки.

### Пояснения к ответам на контрольные вопросы

1. Вы грубо ошиблись. Внимательно прочитайте еще раз материал раздела 8.1 и постарайтесь выбрать правильный ответ.

2. Нет, неверно. Плотность материала  $\rho$ , из которого изготовлен стержень колебательной системы, мы изменить не можем. Выберите другой вариант ответа.

3. Вы правы. Действительно, если произведение  $\rho c$ , которое называется удельным акустическим сопротивлением среды, везде одинаково, то такая среда является акустически однородной. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

4. Ваш ответ правильный, но неполный. Падение звуковой энергии перпендикулярно к границе раздела сред, является одним из условий, необходимых для образования стоячей звуковой волны. Попробуйте среди ответов найти второе необходимое условие. Если Вам это удастся, можете приступить к ответу на контрольный вопрос 22.

5. Нет. Вы ошиблись. Использовать формулу Лапласа для расчета скорости звука в жидкости нельзя, потому, что  $K$  и  $\rho$  зависят от таких параметров, как температура, соленость, статическое давление. Причем эта зависимость неизвестна. Прочитайте еще раз материал п. 5.1 и выберите другой ответ.

6. Ответ верный, но неполный. Преобразование электрической энергии в механическую энергию колебаний колебательной системы это лишь первая часть процесса излучения. Если среди ответов Вы найдете и вторую часть процесса, то можете переходить к ответу на контрольный вопрос 32.

7. Ошибка. Не может излучение считаться направленным, если звуковая энергия от излучателя распространяется по всем направлениям. Прочитайте еще раз материал п. 6.3 и выберите другой ответ.

8. Ваш ответ ошибочен. Это не может быть расчетная скорость звука, так как она меньше минимального значения скорости звука в море. Прочитайте еще раз материал п. 7.1 и выберите правильный ответ.

9. Нет, Вы ошиблись. Прочитайте еще раз материал п. 8.1, обратив особое внимание на рис. 8.1, и выберите другой ответ.

10. Нет, неверно. Определение скорости судна на основе измерения частоты происходит в доплеровском лаге и к корреляционному лагу не имеет никакого отношения. Прочитайте внимательно материал п. 9.1 и выберите правильный ответ.

11. Ответ совершенно неверный. Прочитайте еще раз материал п. 10.2 и выберите правильный ответ.

12. Вы правы. Действительно, если акустическое сопротивление второй среды будет значительно больше, чем первой, то в этом случае обе волны (и падающая, и отраженная) будут иметь одинаковую фазу. Приступайте к ответу на контрольный вопрос 20.

13. Вы совершенно правы. Эти антенны потому и называются рупорными, так как их конический отражатель имеет форму рупора. Переходите к ответу на контрольный вопрос 33.

14. Да, Вы правы. Отвечайте на следующий контрольный вопрос.

15. Да, Вы абсолютно правы. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

16. Вы не правы. Если в различных точках среды удельное акустическое сопротивление среды имеет различное значение, то такая среда не может считаться акустически однородной. Выберите другой вариант ответа.

17. Вы ошиблись. Если угол падения будет равен  $90^\circ$ , то это означает, что звуковая волна распространяется вдоль границы раздела сред. Выберите другой ответ.

18. Совершенно правильно. Шестилучевой лаг вырабатывает информацию о скорости перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна, но не только ее. Лаг способен выдавать еще два вида информации. Если Вы определите дополнительно два правильных ответа, то можете приступать к изучению материала лекции 11.



19. Ответ правильный, но неполный. Если Вы найдете еще один правильный ответ, то можете приступить к ответу на следующий контрольный вопрос.

20. Да, Вы правы. Такой излучатель не обладает направленным действием. Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос.

21. Нет, неверно. Выберите другой ответ.

22. Грубая ошибка. Если сигнал излучать в горизонтальной плоскости, то он никогда не отразится от морского дна. Попробуйте выбрать другой ответ.

23. Вы совершенно правы. Можете приступить к ответу на следующий контрольный вопрос.

24. Вы правы. Переходите к ответу на контрольный вопрос 27.

25. Неверно. Чтобы устранить линейную составляющую поправки лага, необходимо иметь информацию об истинной скорости судна на полном ходу. Прочитайте еще раз материал п. 10.2 и выберите правильный ответ.

26. Вы правы, но этот лаг измеряет не только продольную составляющую скорости судна. Если Вы правильно найдете ответ, в котором указано, какую еще скорость измеряет лаг, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

27. Вы ошиблись. В уравнении неразрывности нет величины, которая характеризует изменение давления. Прочитайте еще раз материал п. 2.1 и попробуйте определить правильный ответ.

28. Вы ошибаетесь. Найдите в п. 3.2 определение закона отражения и попытайтесь выбрать правильный ответ.

29. Ошибка. Если акустические сопротивления сред равны, то в этом случае отсутствует отражение, так как среда акустически однородна и нет границы раздела сред. Прочитайте еще раз материал лекции 5 и выберите правильный ответ.

30. Ответ правильный, но неполный. Кроме солености скорость звука в море зависит других параметров. Прочитайте еще раз материал п. 5.1 и если Вы определили два других параметра, то можете отвечать на контрольный вопрос 28.

31. Вы ошиблись. В процессе излучения звуковая энергия не может превращаться в энергию колебаний колебательной системы. Прочитайте еще раз материал п. 6.1 и выберите другой ответ.

32. Вы ответили правильно. Действительно, у направленной антенны максимум излучаемой энергии будет наблюдаться по направлению, перпендикулярному к плоскости излучаемой поверхности. Переходите к ответу на следующий контрольный вопрос.

33. Да, Вы абсолютно правы. Именно такое значение имеет расчетная скорость звука, которая заложена в отечественных эхолотах. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

34. Вы совершенно правы. Приступайте к ответу на следующий вопрос.

35. Вы неправы. Прочитайте еще раз материал п. 9.1 и выберите другой ответ.

36. Вы ответили правильно. Постоянная составляющая поправки лага устраняется, когда судно не имеет хода относительно воды. Можете отвечать на вопросы контрольной работы.

37. Вы ответили правильно, но неполно. Этот лаг действительно измеряет поперечную составляющую скорости судна, но не только ее. Лаг способен выдавать еще два вида информации. Если Вы определите дополнительно два правильных ответа, то можете приступать к изучению материала лекции 11.

38. Ошибка. Действительное значение скорости звука может быть и больше расчетного, и меньше. Подумайте и выберите правильный ответ.

39. Нет, Вы ошибаетесь. Разрешающая способность приемника – это нечто другое. Прочитайте еще раз материал п. 6.4 и выберите другой ответ.

40. Ваш ответ правильный наполовину. Магнестрикционная излучающая антенна может быть поляризованной, а вот принимающая – должна быть поляризованной всегда. Пользуясь этой подсказкой, найдите полностью правильный ответ.

41. Грубая ошибка. Прочитайте еще раз материал п. 5.3 и выберите другой ответ.

42. Неверно. Найдите в п. 4.1 выражения (4.5), (4.7), (4.9) и (4.11). Попробуйте с их помощью найти правильный ответ.

43. Вы совершенно правы. Во время колебаний частицы сталкиваются, передавая друг другу часть энергии. Скорость передачи энергии от одной частицы к другой называется скоростью звука. Переходите к ответу на следующий контрольный вопрос.

44. Неверно. Уравнение неразрывности не может характеризовать связь между изменениями плоскости и давления. Выберите другой вариант ответа.

45. Нет, неверно. Такого быть не может. Сравните выражения (2.19) и (2.20) и определите правильный ответ.

46. Не совсем верно. Такое возможно только в том случае, если танк, в котором размещена антенна, заполнен морской водой, а на практике танк заполняется специальной жидкостью. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

47. Правильно, но неполно. Действительно, одним из условий возникновения стоячей звуковой волны является значительное отличие акустических сопротивлений сред, но есть еще одно необходимое условие. Попробуйте найти его среди предложенных ответов. Если у Вас получится, то можете переходить к ответу на следующий контрольный вопрос.

48. Ответ правильный, но неполный. Кроме температуры скорость звука в море зависит и от других параметров. Если Вы определили два других параметра, от которых зависит скорость звука в море, то можете ответить на следующий контрольный вопрос.

49. Неверно. Энергия механических колебаний не преобразуется в электрическую энергию при излучении сигнала. Прочитайте ещё раз материал п. 6.1 и попробуйте найти правильный ответ.

50. Ничего подобного. Частота колебаний не может определять фронт звуковой волны. Попробуйте выбрать другой ответ.

51. Нет, ответ ошибочный. Если вспомнить, что скорость звука в море может быть в пределах 1440... 1580 м/с, то Вы поймете, в чем Ваша ошибка. Попробуйте выбрать другой ответ.

52. Вы ответили правильно. Именно продольную составляющую скорости судна измеряет однолучевой лаг. Отвечайте на следующий контрольный вопрос.

53. Да, Вы совершенно правы. Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос.

54. Нет, неверно. Колебательной скоростью не является скорость передачи возмущения от одной частицы к другой. Выберите другой ответ.

55. Вы совершенно правы. Под математическим символом  $\nabla$  скрыты все три координаты  $(x, y, z)$ , а это означает, что приведенное в контрольном вопросе уравнение описывает процессы, происходящие в сферической звуковой волне. Приступайте к ответу на контрольный вопрос 8.

56. Вы ошибаетесь. Внимательно изучите материал п. 2.3 и выберите другой вариант ответа.

57. Ваш ответ ошибочный. Равенство  $\theta_i = \theta_r$  не может быть законом отражения. Прочитайте еще раз материал п. 3.2 и выберите другой вариант ответа.

58. Да, Вы совершенно правы. Принцип действия индукционного лага основан на законе электромагнитной индукции, который известен как закон Фарадея. Можете приступить к ответу на следующий контрольный вопрос.

59. Вы не совсем правы. Прочитайте еще раз материал п. 2.4 и найдите правильный ответ.

60. К сожалению, Вы ошиблись. Действительное значение скорости звука может быть и больше расчетного, и меньше. Подумайте и выберите правильный ответ.

61. Да, Вы правы. Это именно чувствительность принимающей антенны. Можете приступить к изучению материала лекции 9.

62. Ответ ошибочный. Пьезоэлектрическая антенна поляризации не требует. Выберите другой ответ.

63. Ответ неверный. Прочитайте еще раз материал п. 5.3 и выберите другой ответ.

64. Ответ правильный, но неполный. Прочитайте еще раз материал п. 5.1 и выберите два других ответа, в которых указаны правильно параметры, от которых зависит скорость звука в море. Если Вам это удалось, то можете приступить к ответу на следующий контрольный вопрос.

65. Да, Вы совершенно правы. Скорость звука в море может изменяться в пределах 1440 ... 1580 м/с, а расчетная скорость звука  $c_0 = 1500$  м/с. Приступайте к изучению материала лекции 10.

66. Вы ошибаетесь. Прочитайте еще раз материал п. 6.3 и выберите правильный ответ.

67. Да, Вы совершенно правы. Частота посылок импульсов зависит от максимальной глубины диапазона, в котором работает эхолот. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

68. Ошибка. Однолучевой лаг излучает сигнал в диаметральной плоскости судна, поэтому он не может измерять поперечную составляющую скорости судна. Выберите другой ответ.

69. Да, Вы совершенно правы. Равенство углов падения  $\theta_i$  и отражения  $\theta_r$  звуковых лучей является законом отражения. Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос 18.

70. Вы правы. Этот лаг измеряет продольную составляющую скорости судна, но не только ее. Он способен выдавать еще два вида информации. Если Вы определите еще два правильных ответа, то можете приступить к изучению материала лекции 11.

71. Вы правы. В жидкости действительно можно возбудить продольную звуковую волну, так как жидкость обладает упругостью при сжатии. Переходите к ответу на вопрос 4.

72. Да, Вы правы. Из выражения (2.4) видно, что это действительно так. Переходите к изучению материала лекции 3.

73. Нет, Ваш ответ ошибочный. Прочитайте материал п. 2.3 и выберите другой вариант ответа.

74. Правильно. Именно коэффициент отражения показывает, какая часть энергии отразилась от границы раздела сред по сравнению с энергией, падающей звуковой волны. Можете приступить к ответу на следующий контрольный вопрос.

75. Да, это так. В выражение для интенсивности стоячей звуковой волны (4.13) входит интеграл

$$\int_0^T \sin kct \cos kct dt,$$

который в заданных пределах равен нулю. Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 25.

76. Вы ошибаетесь. Прочитайте еще раз материал п. 9.2 и выберите правильный ответ.

77. Неверно. И причем тут закон Ома? Прочитайте еще раз материал п. 10.1 и выберите другой ответ.

78. Грубая ошибка. Лаг не может измерять скорость вертикального перемещения судна. Подумайте и выберите правильный ответ.

79. Вы ответили правильно. Именно эту погрешность можно уменьшить соответствующей регулировкой эхолота. Отвечайте на следующий контрольный вопрос.

80. Да, Вы правы. При таком соотношении  $\lambda$  и  $l$  антенна будет обладать определенной направленностью, но это частный случай. Попробуйте найти ответ, в котором записано условие направленности антенны в общем виде.

81. Вы правы. Только магнитоотрицательная антенна может быть поляризованной. Переходите к изучению материала лекции 8.

82. Неверно. Обеспечение направленности излучения за счет создания специальной формы излучающей поверхности происходит у фокусирующих антенн. Прочитайте еще раз материал п. 6.1 и выберите другой ответ.

83. Вы грубо ошиблись. Эффект Доплера не имеет никакого отношения к принципу действия индукционного лага. Выберите другой ответ.

84. Нет, неверно. Имея информацию о скорости движения одной точки (в которой расположена антенна) в продольном и поперечном направлении, невозможно определить скорость перемещения в поперечном направлении носа и кормы судна. Прочитайте еще раз материал п. 8.3 и выберите другой ответ.

85. Вы ошибаетесь. Методическая погрешность эхолота зависит от метода, заложенного в его принцип действия. Выберите другой ответ.

86. Вы правы. Как видно из выражения для  $f$ , при изменении размера стержня  $L$  будет изменяться частота его собственных колебаний. Приступайте к ответу на контрольный вопрос 35.

87. Вы совершенно правы. Точки среды, в которых имеет место удвоение амплитуды давления или колебательной скорости, действительно называются пучностями. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

88. Ошибка. Попробуйте выбрать другой ответ.

89. Вы ошиблись. При сдвиге слоев жидкости отсутствуют деформации сдвига, поэтому поперечную волну в жидкости возбудить нельзя. Прочитайте еще раз материал п. 1.2 и выберите другой ответ.

90. Неверно. В волновом уравнении плоской звуковой волны имеется только одна координата  $x$ . Еще раз внимательно прочитайте материал п. 2.1 и выберите правильный ответ.

91. Неверно. Разве в формуле Умова (2.22) величины  $p$  и  $v$  относятся к сферической звуковой волне? Выберите другой вариант ответа.

92. Ошибка. Не может коэффициент преломления определять, какая часть энергии отражается от границы раздела сред. Выберите другой ответ.

93. Нет, неверно. Прочитайте еще раз материал п. 1.2 и выберите правильный ответ.

94. Неверно. При относительном движении источника и приемника звука изменяется не амплитуда, а другой параметр звуковой волны. Прочитайте еще раз материал п. 5.5 и выберите другой ответ.

95. Ваш ответ ошибочен. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

96. Вы неправы, прочитайте еще раз материал п. 9.1 и выберите другой ответ.

97. Неверно. Имея информацию только о скорости судна вдоль ДП, невозможно определить скорость перемещения носа и кормы судна в поперечном направлении. Прочитайте еще раз материал п. 8.1 и выберите другой ответ.

98. Вы совершенно неправы. Время между посылками импульсов должно быть таким, чтобы излученный сигнал успел дойти до грунта и вернуться в приемник. Выберите другой ответ.

99. Да, Вы совершенно правы. Ширину главного лепестка диаграммы направленности антенны определяет приведенное в вопросе выражение для случая, когда  $n = 1$ . Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос.

100. Вы ответили верно, но неполно. Прочитайте еще раз материал п. 5.3 и попробуйте найти еще один правильный ответ. Если у Вас это получится, то можете переходить к изучению материала лекции 7.

101. Ваш ответ неверный. С учетом того, что оба луча находятся в ДП судна, попробуйте найти правильный ответ.

102. Да, Вы правы. Колебание частиц относительно своего положения равновесия происходит с некоторой скоростью, которая называется колебательной скоростью. Переходите к ответу на вопрос 2.

103. Вы ошибаетесь. Прочитайте еще раз материал п. 5.3 и выберите другой ответ.

104. Вы ответили неверно. Точки среды, в которых наблюдается удвоение амплитуды колебательной скорости или звукового давления не называются узлами. Прочитайте еще раз материал п. 4.1 и выберите другой ответ.

105. Да, Вы правы. Именно такую размерность имеет коэффициент  $\beta$ , рассчитанный по приведенной в вопросе формуле. Переходите к изучению материала лекции 4.

106. Нет, Вы ошиблись. Сложная звуковая волна может возникнуть только в том случае, когда одновременно существуют и продольная, и поперечная звуковые волны. В жидкости такого быть не может. Попробуйте выбрать другой ответ.

107. Нет, Вы ошиблись. В уравнении состояния нет величины, которая характеризует колебательное движение. Выберите другой вариант ответа.

108. Нет, Вы ошибаетесь. Из формулы Умова (2.22) не видно, что речь идет о цилиндрической звуковой волне. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

109. Неверно. Прочитайте еще раз материал п. 8.3 и выберите другой ответ.

110. Вы ошибаетесь. Прочитайте еще раз материал п. 4.1 и попробуйте найти правильный ответ.

111. Ваш ответ ошибочен. Обеспечение направленности антенны за счет суммирования волн, которые создаются каждой точкой излучающей поверхности, происходит в интерференционных антеннах. Прочитайте еще раз материал п. 6.1 и попробуйте найти правильный ответ.

112. Вы абсолютно правы. Пьезоэлектрические антенны взаимозаменяемы. Они могут работать как на излучение, так и на прием. Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос.

113. Вы ответили правильно. С увеличением ширины диаграммы направленности ( $\Delta\theta$ ) становится более острым пик кривой коэффициента взаимной корреляции, а значит и точнее определяется время, когда  $\rho_{1,2} = 1$ . Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

114. Вы ответили правильно, но не полно. Если Вы правильно найдете ответ, в котором указано, какую еще скорость измеряет лаг, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

115. Нет, неверно. Подумайте и выберите другой вариант ответа.

116. Вы ответили неверно. Попробуйте на основании анализа коэффициента взаимной корреляции:

$$\rho_{1,2}(\tau) = e^{-2\pi \left[ \frac{\Delta\theta^2 f_0^2}{c^2} (L - V_x \tau_3)^2 \right]}$$

определить правильный ответ.

117. Грубая ошибка. Внимательно прочитайте еще раз материал п. 8.2 и попробуйте выбрать правильный ответ.

118. Верно. Такая реверберация есть. Но она бывает трех видов. Попробуйте среди ответов найти еще два правильных. Если Вам это удалось, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

119. Да, Вы правы. В том случае, когда  $\rho_{2c_2} \gg \rho_{1c_1}$ , амплитуда суммарного давления в стоячей звуковой волне изменяется именно по этому закону.



Попробуйте найти правильный ответ для случая, когда  $\rho_{1c_1} \gg \rho_{2c_2}$ . Если у Вас получится, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

120. Вы ошиблись. Наличие множителя  $e^{-\alpha x}$  в выражении для закона изменения звукового давления никак не может говорить о том, что амплитуда звукового давления увеличивается по экспоненте. Выберите другой вариант ответа.

121. Правильно. Форма звуковой волны определяется её фронтом. Переходите к ответу на следующий контрольный вопрос.

122. Ошибка. Прочитайте еще раз материал п. 2.1 и выберите правильный ответ.

123. Вы совершенно правы. В формуле Умова (2.22) звуковое давление и колебательная скорость могут относиться к звуковой волне любой формы. Приступайте к ответу на контрольный вопрос 13.

124. Ваш ответ ошибочен. Прочитайте еще раз материал п. 3.4 и выберите другой ответ.

125. К сожалению, Вы ошиблись. Прочитайте еще раз материал п. 4.1 и выберите другой ответ.

126. Ошибка. Выберите другой ответ.

127. Ошибка. Прочитайте еще раз материал п. 9.2 и выберите правильный ответ.

128. Ошибка. Прочитайте еще раз материал п. 8.2 и выберите другой вариант ответа.

129. Ошибка. Подумайте и выберите другой ответ.

130. Ответ правильный, но неполный. Из выражения для  $\Gamma_{ор}$  видно, что уменьшение мощности излучаемого сигнала ( $N$ ) приводит к уменьшению  $\Gamma_{ор}$ . Но есть еще один параметр, который мы можем изменять, тем самым оказывая влияние на величину интенсивности объемной реверберации. Если Вы правильно определите этот параметр, то можете приступать к изучению материала лекции 7.

131. Верно. Такая реверберация есть, но она бывает трех видов. Попробуйте среди ответов найти еще два правильных. Если Вам это удалось, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

132. Ответ правильный, но только для случая  $\rho_{1c_1} \gg \rho_{2c_2}$ . Попробуйте найти правильный ответ для случая, когда  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ . Если у Вас это получится, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

133. Вы совершенно правы. Наличие множителя  $e^{-\alpha x}$  говорит о том, что амплитуда звукового давления действительно уменьшается по экспоненциальному закону. Переходите к ответу на вопрос 15.

134. Ваш ответ ошибочен. Это хорошо видно из выражения (4.13). Внимательно прочитайте еще раз материал п. 4.1 и выберите другой ответ.

135. Нет, Ваш ответ ошибочный. Частота не определяет форму звуковой волны. Прочитайте еще раз материал п. 1.2 и попробуйте найти правильный ответ.

136. Да, Вы ответили правильно. Переходите к ответу на контрольный вопрос 9.

137. Вы ответили неверно. Величина  $\alpha x$  в выражении для закона изменения звукового давления не может быть фазой. Внимательно прочитайте еще раз материал п. 2.3 и выберите другой вариант ответа.

138. Вы ответили неверно. Прочитайте еще раз п. 3.4 и выберите другой вариант ответа.

139. Вы правы.  $S$  – это расстояние между антенной и днищем судна. В этом пространстве образуется стоячая звуковая волна. Так как это пространство заполнено какой-то жидкостью, то  $\lambda_1$  действительно есть длина волны в этой жидкости. Переходите к изучению материала лекции 6.

140. Ответ неверный. Выберите другой ответ.

141. Ответ ошибочный. В звуковом поле частицы жидкости совершают колебания относительно своего положения равновесия, поэтому скорость их колебаний не может быть скоростью распространения звука. Выберите другой ответ.

142. Точно. В уравнение неразрывности входит величина  $\alpha$ , которая определяет изменение плотности, и величина  $\varphi$ , характеризующая колебательное движение. Переходите к ответу на контрольный вопрос 7.

143. Вы ответили не совсем правильно. Модуль Юнга  $E$  – величина постоянная для материала, из которого изготовлен стержень, т.е. мы не можем изменять  $E$ . Выберите другой ответ.

144. Ошибочный ответ. Частота излучаемого сигнала никак не определяет разрешающую способность эхолота по глубине. Прочитайте еще раз материал п. 7.2 и выберите правильный ответ.

145. Вы совершенно правы. Если  $\lambda < l$ , то всегда существует  $\sin \gamma$ , а это означает, что есть угол  $\gamma$ , который определяет направленность антенны. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

146. Нет, это не так. В общем случае скорость колебательного движения и звуковое давление не изменяются синфазно. Прочитайте еще раз материал п. 2.3 и выберите другой ответ.

147. Нет, Вы абсолютно неправы. Прочитайте еще раз материал п. 6.3 и выберите другой вариант ответа.

148. Вы допустили ошибку. Из сравнения формул (5.14) и (5.16) видно, что при наличии движения приемника относительно излучателя фаза потенциала скорости не изменяется. Выберите другой ответ.

149. Верно. Такая реверберация есть. Но реверберация бывает трех видов. Попробуйте среди ответов найти еще два правильных. Если найдете, то можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

150. Ответ неверный. Длина волны входит в формулу для расчета величины  $S$ , которая определяет отстояние антенны от днища судна. Внимательно прочитайте еще раз материал п. 4.2 и попробуйте найти правильный ответ.

151. Неверно. Глядя на выражение для закона изменения звукового давления, никак нельзя согласиться с тем, что амплитуда давления остается неизменной. Выберите другой вариант ответа.

152. Вы ошибаетесь. Из приведенного в контрольном вопросе волнового уравнения не видно, что это волна цилиндрическая. Попробуйте выбрать другой ответ.

153. Ваш ответ ошибочен. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

154. Нет, Вы ошиблись. Попробуйте выбрать другой ответ.

155. Ваш ответ ошибочный. Найдите в материале п. 2.2 формулу, которая является законом изменения потенциала скорости, и выберите правильный ответ

156. Вы ошиблись. В выражении для закона изменения давления величина  $k_c$  является коэффициентом при времени  $t$ , а в любой колебательной функции это не фаза. Выберите другой вариант ответа.

157. Да, Вы правы. Когда акустическое сопротивление первой среды много больше, чем второй, то в этом случае отраженная и преломленная волны будут находиться в противофазе. Переходите к изучению материала лекции 5.

158. Нет неверно. Скорость звука в море не зависит от прозрачности воды. Прочитайте еще раз материал п. 5.1 и выберите другой ответ.

159. Вы ответили правильно. Учитывая, что разрешающая способность эхолота по глубине связана с длиной импульса, т.е. с расстоянием, которое

проходит импульс за время, равное его длительности, можно утверждать, что она зависит от длительности импульса. Приступайте к ответу на следующий контрольный вопрос.

160. Вы ошибаетесь. Если в выражение для  $\sin \gamma$  при  $n = 1$  подставить значения  $l$  и  $\lambda$ , то в случае, когда  $\lambda > l$ , получим, что  $\sin \gamma > 1$ , а такого быть не может. Прочитайте еще раз материал п. 6.3 и выберите другой ответ.

161. Вы ответили неверно. Эта формула справедлива для случая, когда  $n = 2$ , а это не главный, а боковой лепесток диаграммы направленности. Внимательно прочитайте еще раз материал п. 6.3 и найдите правильный ответ.

162. Неверно. Использование нелинейного взаимодействия звуковых волн большой амплитуды осуществляется в параметрических антеннах. Попробуйте выбрать другой ответ.

163. Да. Вы совершенно правы. Именно частота сигнала изменяется при перемещении приемника относительно излучателя. Переходите к ответу на следующий контрольный вопрос.

164. Неверно. Выберите другой ответ.

165. Вы ошиблись. Прочитайте внимательно материал п. 4.1 и попробуйте выбрать правильный ответ.

166. Да, Вы совершенно правы. Переходите к ответу на контрольный вопрос 14.

167. Грубая ошибка. Прочитайте еще раз материал п. 2.2 и попробуйте выбрать правильный ответ.

168. Да, Вы правы. Именно поверхность, соединяющая точки звукового поля, которые совершают колебания с одинаковой фазой, называется фронтом звуковой волны. Можете переходить к изучению материала лекции 2.

#### **Ответы на вопросы контрольной работы**

1 – а, в, г; 2 – а, б, г; 3 – б; 4 – а; 5 – в; 6 – г; 7 – б; 8 – в; 9 – б; 10 – а; 11 – в; 12 – б; 13 – в; 14 – в; 15 – в; 16 – а; 17 – б; 18 – а; 19 – а; 20 – б, в.

#### **Библиографический список**

1. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Воронов В.В. Технические средства судовождения: теория. – СПб.: Элмор, 1996. – 544 с.
2. Букатый В.М. Промысловая гидроакустика и гидролокация. – М.: Мир, 2003. – 494 с.

## Оглавление

Предисловие.....	3
Введение .....	4
<b>Лекция 1 .....</b>	<b>5</b>
1. Основные закономерности звукового поля .....	5
1.1. Физическая природа звука .....	5
1.2. Вид и форма звуковой волны .....	6
1.3. Основные параметры звукового поля .....	8
Контрольные вопросы .....	9
<b>Лекция 2 .....</b>	<b>9</b>
2. Распространение звуковых волн в акустически однородной среде .....	9
2.1. Составление волнового уравнения .....	10
2.2. Решение волнового уравнения плоской звуковой волны, распространяющейся в вязкой жидкости .....	11
Контрольные вопросы .....	14
<b>Лекция 3 .....</b>	<b>15</b>
2.3. Анализ звукового поля .....	15
2.4. Интенсивность звука .....	17
2.5. Дальность распространения звуковых волн .....	18
Контрольные вопросы .....	20
<b>Лекция 4 .....</b>	<b>21</b>
3. Распространение звуковых волн в акустически неоднородной среде .....	21
3.1. Физическая сущность отражения и преломления звуковых волн .....	22
3.2. Геометрические соотношения в падающей, отраженной и преломленной волнах .....	23
3.3. Энергетические соотношения в падающей, отраженной и преломленной волнах .....	26
3.4. Фазовые соотношения в падающей и отраженно волнах .....	30
Контрольные вопросы .....	30
<b>Лекция 5 .....</b>	<b>31</b>
4. Интерференция звуковых волн .....	31
4.1. Стоячая звуковая волна .....	32
4.2. Прохождение звука через обшивку корпуса судна .....	34
Контрольные вопросы .....	36

<b>Лекция 6</b> .....	<b>37</b>
5. Особенности распространения звука в море .....	37
5.1. Скорость звука в море .....	37
5.2. Рефракция звуковых лучей .....	41
5.3. Реверберация .....	46
5.4. Дифракция звуковых волн .....	48
5.5. Влияние относительного движения источника или приемника на параметры звуковой волны .....	49
Контрольные вопросы .....	51
<b>Лекция 7</b> .....	<b>52</b>
6. Источники и приемники звука .....	52
6.1. Колебательные системы антенн .....	52
6.2. Пьезоэлектрические и магнитострикционные антенны .....	56
Контрольные вопросы .....	60
<b>Лекция 8</b> .....	<b>62</b>
6.3. Направленное действие антенн .....	62
6.4. Прием звуковых колебаний .....	66
6.5. Линейная антенна .....	67
Контрольные вопросы .....	69
<b>Лекция 9</b> .....	<b>70</b>
7. Акустический метод измерения глубины .....	70
7.1. Принцип измерения глубины эхолотом .....	71
7.2. Основные параметры навигационного эхолота .....	72
7.3. Точность измерения глубины эхолотом .....	74
Контрольные вопросы .....	77
<b>Лекция 10</b> .....	<b>78</b>
8. Гидроакустический доплеровский лаг .....	78
8.1. Однолучевая схема лага .....	78
8.2. Двухлучевые лаги .....	81
8.3. Многолучевые лаги .....	83
8.4. Погрешности доплеровского лага .....	85
8.5. Основные параметры доплеровского лага .....	88
Контрольные вопросы .....	91
<b>Лекция 11</b> .....	<b>92</b>
9. Гидроакустические корреляционные лаги .....	92
9.1. Принцип действия лага .....	92

9.2. Корреляционный лаг с интерполяционным методом обработки сигнала .....	95
9.3. Основные параметры лага .....	97
9.4. Погрешности измерения скорости .....	101
10. Индукционные лаги .....	102
10.1. Основы теории лага .....	102
10.2. Погрешность измерения скорости индукционным лагом .....	105
Контрольные вопросы .....	107
Контрольная работа .....	108
Пояснения к ответам на контрольные вопросы .....	111
Ответы на вопросы контрольной работы .....	124
Библиографический список .....	124

**Яловенко Александр Васильевич,**

д-р техн. наук, проф.

## **ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ**

Тексты лекций  
с элементами программированного обучения  
для студентов заочного обучения



199106, Санкт-Петербург, Косая линия, 15-а

тел./факс 812-322-33-42, 322-77-26

[www.gma.ru](http://www.gma.ru)

e-mail: [izdat@gma.ru](mailto:izdat@gma.ru)

e-mail: [reklama@gma.ru](mailto:reklama@gma.ru)

---

Ответственный за выпуск  
Редактор  
Компьютерная верстка

Сатикова Т.Ф.  
Карамзина Н.А.  
Тюленева Е.И.

Подписано в печать 25.12.2012  
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman  
Усл. печ. л. 8. Тираж 300 экз. Заказ № 241/12