

# Современные автоматизированные системы управления движением судов

## Лекция №9

**Тема:** «Бортовые акустические измерители глубин, дистанций и направлений. **Часть 1:** Особенности распространения акустических волн в водной среде»

### Учебные вопросы и распределение времени:

|  |         |
|--|---------|
| Вступление .....   | 5 мин.  |
| 1. Природа акустических волн .....                                       | 20 мин. |
| 2. Основные параметры акустического поля.....                            | 25 мин. |
| 3. Рефракция, интерференция, отражение и преломление звуковых лучей..... | 25 мин. |
| Выводы и ответы на вопросы.....  | 5 мин.  |

## **Учебная и воспитательная цель:**

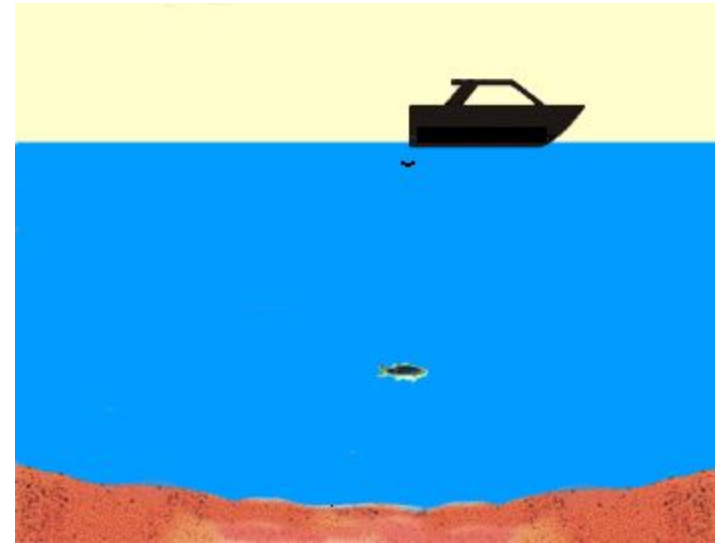
«Формирование у студентов целостного представления о современных автоматизированных системах управления движением судов»

## **Учебная литература:**

1. Алексишин В.Г., Козырь Л.А., Короткий Т.Р. Международные и национальные стандарты безопасности мореплавания. - Одесса: «Латстар», 2002.-257с.
2. Золотов В.В., Фрейдзон И.Р. Управляющие комплексы сложных корабельных систем.-Л.: «Судостроение», 1986.-232с.
3. Вагущенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика. - Одесса: «Латстар», 2003.-170с.
4. Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. - Одесса: «Фенікс», 2005.-272с.
5. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы. - Одесса: «Латстар», 2004.-302с.

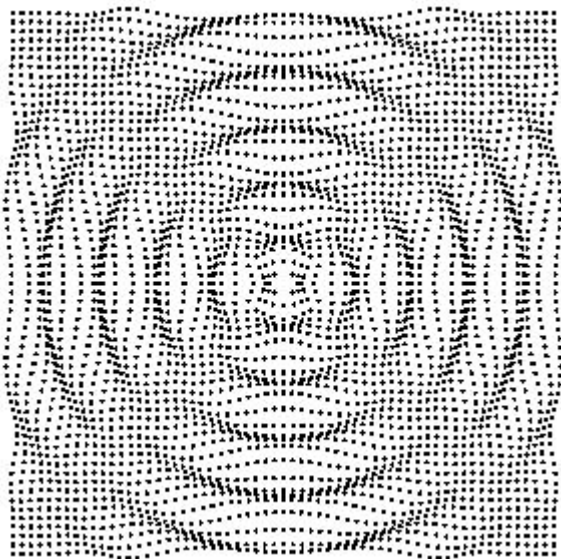
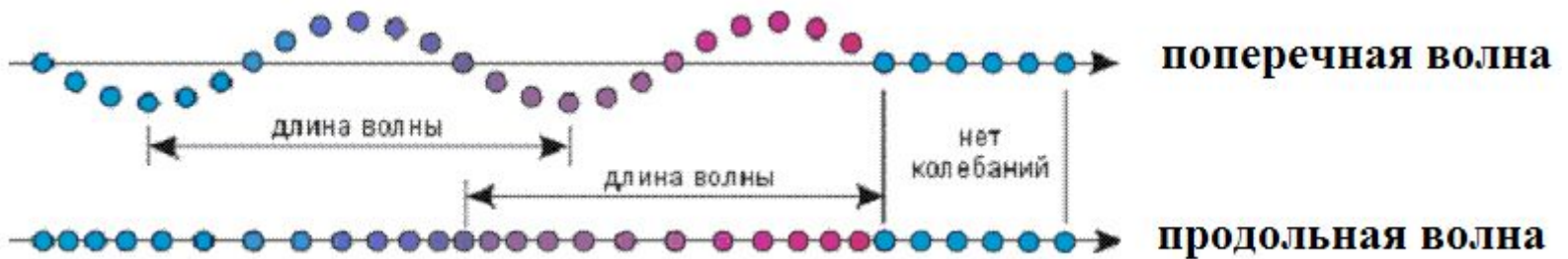
## Природа акустических волн

Для получения различного рода подводной информации наиболее широкое распространение получила аппаратура, в которой используется **способ активной гидролокации**. Этот способ **основан на излучении акустической энергии в водную среду, приеме и обработке эхо-сигналов**, возникающих в результате рассеяния и отражения акустических колебаний от водных объектов.



# Природа акустических волн

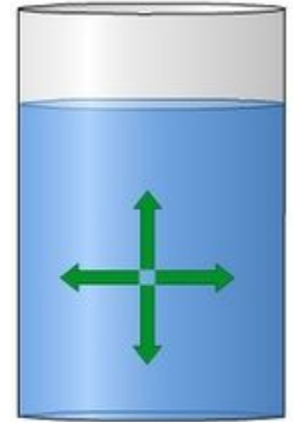
По физической природе звук представляет собой механические колебания частиц упругой среды. В качестве источника звука в жидкости обычно используется колеблющееся твердое тело. При соприкосновении колеблющегося тела с жидкостью возникает сжатие и растяжение прилегающего элемента водной среды и смещение его частиц.



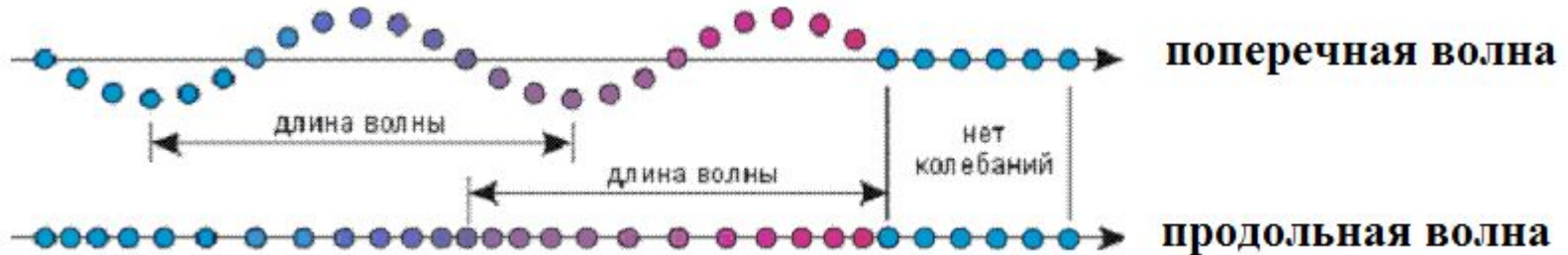
Благодаря взаимодействию соседних элементов среды упругие деформации (области сгущений и разрежений) передаются от одних участков к другим, все, более удаляясь от источника звука.

Такой процесс распространения колебательного движения называется **волновым процессом** или **распространением акустических волн**. Пространство, в котором распространяются звуковые волны, называется **акустическим полем**.

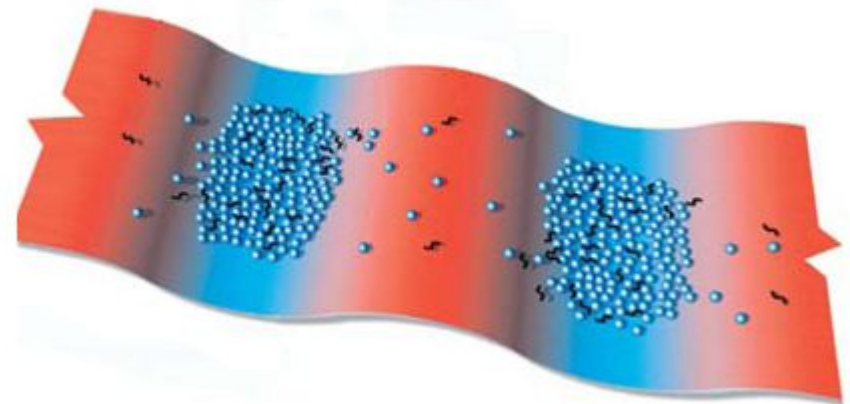
# Природа акустических волн



До акустического воздействия все элементы водной среды находятся только под определенным постоянным давлением, называемым **статическим (гидростатическим)**.

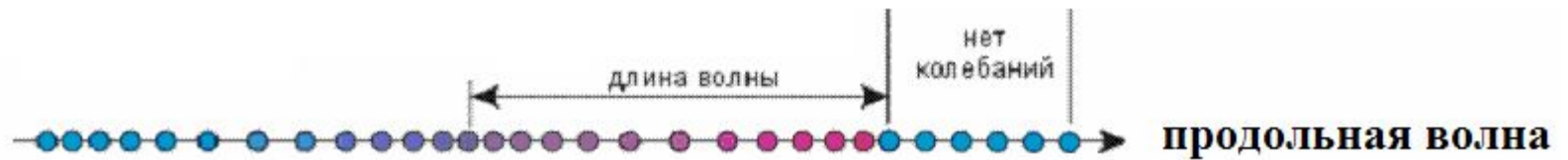


Под давлением звуковой волны в зонах сжатия и разрежения происходит изменение плотности и давления. Поэтому давление, избыточное к гидростатическому (независимо от знака), называют акустическим.



# Природа акустических волн

**В морской среде** из-за отсутствия сдвиговой упругости **могут образовываться только продольные волны**, в которых **колебания частиц совпадают с направлением распространения волны**. При этом частицы жидкости не переносятся акустической волной, а только передают возмущение соседним частицам.

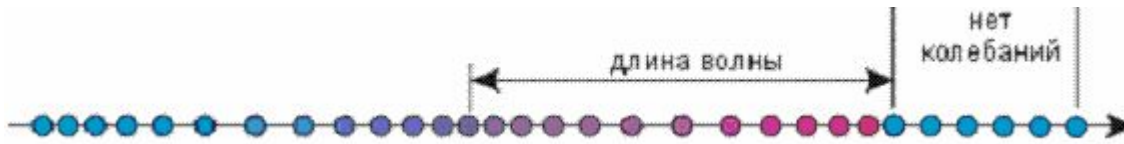


Частицы жидкости совершают около своего положения равновесия колебательные движения, характеризующиеся **амплитудой смещения  $u$**  и **колебательной скоростью  $v$** .

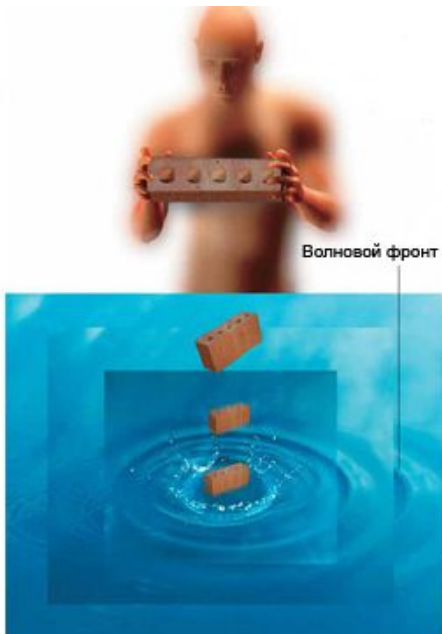
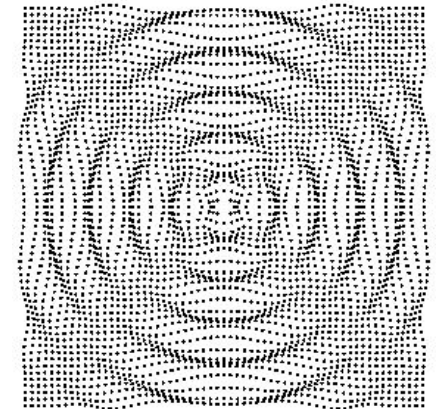
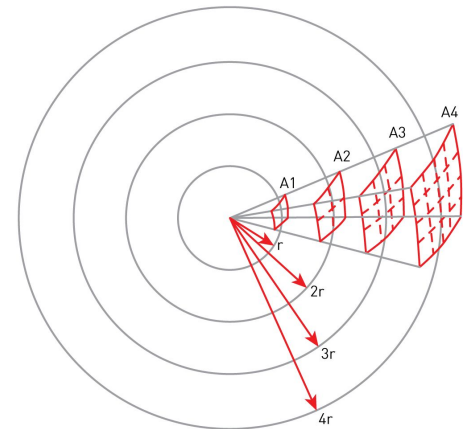
**Акустическая волна** удаляется **от источника звука со скоростью**, получившей название скорости **звука  $c$** . Скорость звука зависит только от свойств среды, причем всегда выполняется условие  $c \gg v$ .

# Природа акустических волн

**Положение колеблющейся частицы жидкости по отношению к положению равновесия характеризуется фазой колебания.**



**Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах, называется волновой поверхностью.** Ее форма зависит от конфигурации источника звука, типа колебаний, характера среды и т.д.



Частным случаем волновой поверхности является **фронт волны** — **геометрическое место точек, до которых к некоторому моменту времени дошло колебание.**

**Направления, по которым распространяются акустические колебания от источника звука, называют акустическими лучами.** В изотропной среде, обладающей одинаковыми свойствами во всех направлениях, эти лучи перпендикулярны волновым поверхностям.

# Природа акустических волн

Гармоническая звуковая волна характеризуется **длиной волны** и **периодом**, которые связаны соотношением:

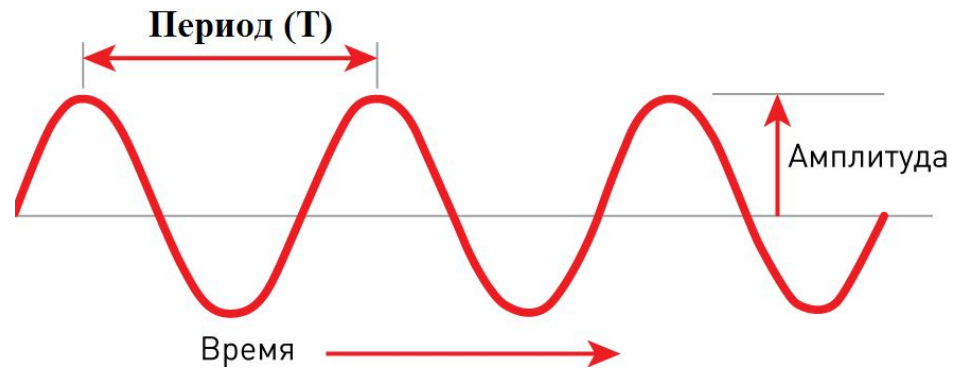
$$T = \frac{\lambda}{c}$$

где  $c$  – скорость звука.

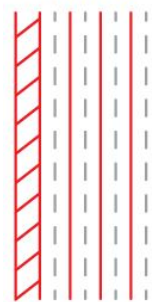
Вместо периода часто пользуются частотой  $f$ , равной числу периодов в единицу времени:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{или} \quad f\lambda = c$$

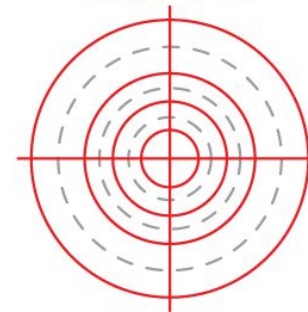
В зависимости от вида источника звука существует несколько видов звуковых волн: **плоские**, **сферические** и **цилиндрические**.



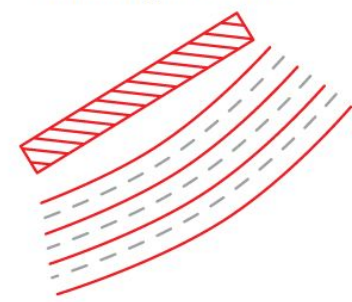
плоские



сферические



цилиндрические



Плоские волны при распространении не меняют форму и амплитуду, сферические не меняют форму (амплитуда уменьшается как  $1/r$ ), цилиндрические меняют и форму, и амплитуду (убывает как  $r^{-0,5}$ ).



# Основные параметры акустического поля

К параметрам акустического поля относятся **акустическое давление  $p$** , **колебательная скорость  $v$**  и **энергия  $E$** .

**Акустическое давление** (переменная часть давления, возникающая при прохождении звуковой волны в среде) является основной количественной характеристикой акустического поля. Оно **изменяется во времени и по мере удаления от источника излучения**, т.е. является функцией координат и времени:

$$p = f_1(x, y, z, t).$$

Акустическое давление измеряется в паскалях (Па). Иногда для характеристики звукового поля применяют **уровень звукового давления  $N$**  – выраженный в децибелах (Дб). Он характеризуется **отношением данного акустического давления к пороговому значению акустического давления**  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па:

$$N = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

## Основные параметры акустического поля

Возникновение акустического давления тесно связано с со скоростью колебаний частиц упругой среды (измеряется в м/с).

**Колебательная скорость**, как и акустическое давление, является функцией координат и времени:

$$v = f_2(x, y, z, t).$$

**Энергия акустического поля** складывается из суммы кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации.

Среднее по времени количество акустической энергии, переносимой за единицу времени звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны называется **интенсивностью или силой звука J (Вт/м<sup>2</sup>)**. Интенсивность звука оценивается также уровнем интенсивности по шкале децибел:

$$N = 20 \lg \left( \frac{J}{J_0} \right)$$

$$J_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

# Уравнение распространения волны в жидкости (волновое уравнение)

Строгий вывод уравнения распространения волны в жидкости довольно сложен из-за наличия многих переменных. Однако, принимая допущения:

- жидкость обладает свойствами акустической однородности;
- длина звуковой волны в ней намного превышает размер молекул;
- смещения материальных частиц в жидкости (изменение акустического давления, температуры и плотности) являются бесконечно малыми;
- жидкость считаем идеальной (пренебрегаем вязкостью и теплопроводностью),

можно записать волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right),$$

где  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  - вспомогательная функция, называемая потенциалом скорости. Частные производные потенциала скорости по координатам дают линейные скорости колебания частиц по соответствующим направлениям:

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

**В реальных гидроакустических приборах принятые допущения учитывают вводом поправочных коэффициентов.**

# Уравнение плоской звуковой волны

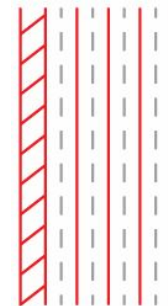
Простейшим типом акустической волны является плоская волна (волна, распространяющаяся только в одном направлении):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$$

Волновое уравнение плоской волны для функции смещения частиц жидкости:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$u$  - амплитуда смещения частиц.



Частным случаем плоской волны является гармоническая плоская волна, волновое уравнение которой имеет следующий вид:

$$u = u_m \sin(\omega t - kx)$$

$u_m$  - амплитудное значение смещения частиц;

$k$  - волновое число ( $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ).

- Колебательная скорость частиц:  $v_x = v_m \cos(\omega t - kx)$ , где  $v_m = u_m \omega$

- Акустическое давление:  $p = p_m \cos(\omega t - kx)$  где  $p_m = \rho c^2 u_m k$

- Интенсивность:  $J = \frac{p_m^2}{2\rho c}$

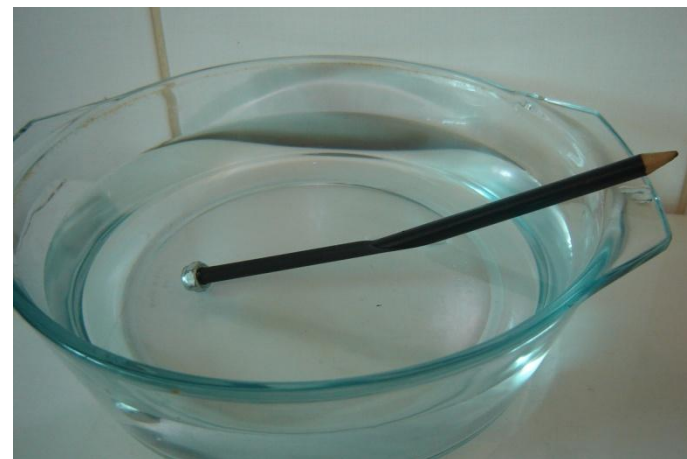
- Скорость распространения акустических волн:  $c = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}}$

При одинаковых амплитудах акустического давления в двух средах с различными плотностями, интенсивность колебаний будет больше в менее плотной среде.

Вертикальное изменение скорости звука приводит к искривлениям звуковых лучей – рефракции.

# Рефракция звука

Рефракция звука вызывается неоднородностью физических свойств водной среды, главным образом по вертикали, вследствие изменения с глубиной гидростатического давления, солености и температуры.



Если на пути распространения звукового луча имеется несколько параллельных слоев жидкости, обладающих различными акустическими свойствами, то **в любой точке звукового луча отношение скорости звука к синусу угла падения есть величина постоянная** (постоянная Снелля):

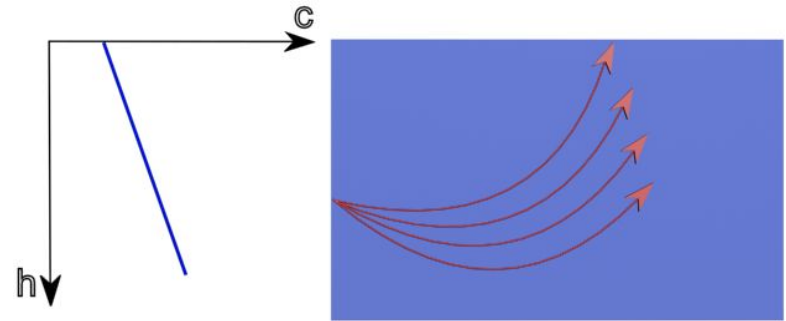
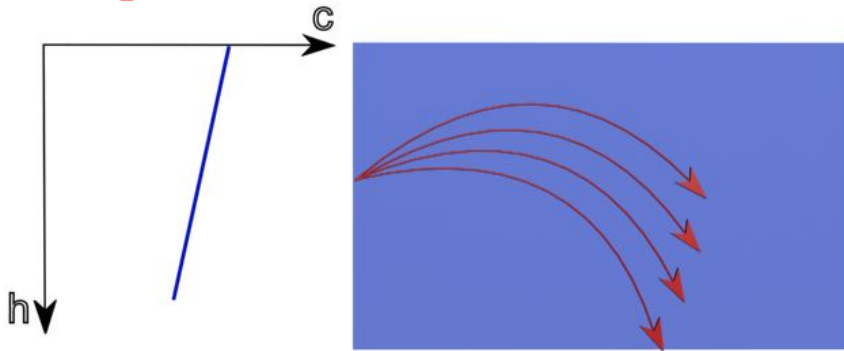
$$\frac{c_1}{\sin \Theta_1} = \frac{c_2}{\sin \Theta_2} = \dots = \text{const.}$$

Отсюда следует, что **если луч пересекает слои воды с различными скоростями звука, то углы его наклона в этих слоях тоже различны.** Луч всегда изгибается в сторону уменьшения скорости звука, и угол уменьшается, если уменьшается величина  $c$ .

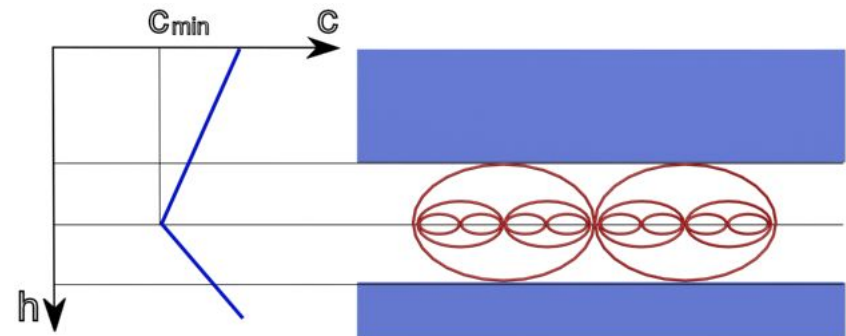
# Рефракция звука

Существуют рефракционные траектории (лучевые картины) распространения звука

При отрицательном градиенте скорости звука акустические лучи искривляются в сторону дна, при положительном – в сторону водной поверхности.



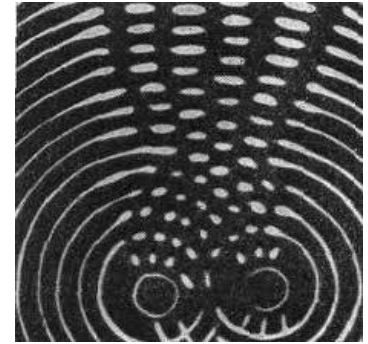
При смене отрицательного градиента на положительный в толще воды образуется подводный звуковой канал (ПЗК). Осью звукового канала считается глубина, на которой скорость звука минимальна. Верхней и нижней границей являются глубины, на которых скорость звука одинакова.



Если источник звука расположить на оси ПЗК, то вследствие внутреннего отражения, энергия не выйдет за пределы канала и распространится на большие расстояния при минимальных потерях.

# Интерференция

В акустическом поле возможно **сложение двух и более волн**, при котором в различных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Это явление **называют интерференцией**.



Пусть **перпендикулярно к границе раздела двух сред падает плоская волна**. Тогда **отраженная волна пойдет также по перпендикулярному направлению к отражающей поверхности, только в противоположном направлении**.

**Произойдет наложение падающей и отраженной волн**. Результирующие значения колебательной скорости  $\mathbf{v}$  и звукового давления  $\mathbf{p}$  в некоторой точке акустического поля, отстоящей от границы раздела на расстоянии  $\mathbf{x}$ :

$$\begin{cases} v_x = v_m \cos(\omega t - kx) - V_m \cos(\omega t + kx) = a \sin \omega t, \\ p = p_m \cos(\omega t - kx) + P_m \cos(\omega t - kx) = b \cos \omega t, \end{cases}$$

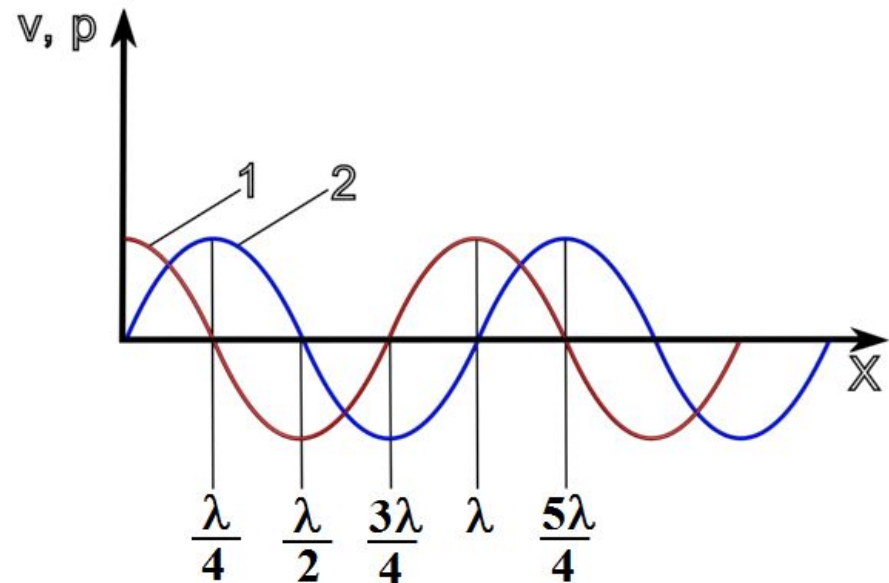
$$a = 2v_m \sin kx = 2v_m \sin \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

$$b = 2p_m \cos kx = 2p_m \cos \frac{2\pi}{\lambda} x.$$

# Интерференция

В результате сложения падающей и отраженной волн возникает плоская гармоническая волна той же частоты, амплитуда которой зависит от расстояния до границы раздела. В некоторых точках амплитуды максимальны, в некоторых равны нулю. **Первые называются пучностями, а вторые — узлами.**

Пучности и узлы смещены относительно один другого на расстояние  $\lambda/2$ . Характерной особенностью стоячей волны по сравнению с бегущей является то, что в ней все точки между соседними узлами совершают колебания с одинаковой фазой. Таким образом, в пространстве, где складываются падающие и отраженные волны, в одних точках есть смещение частиц, но нет давления, а в других, наоборот есть давление, но нет смещения частиц.

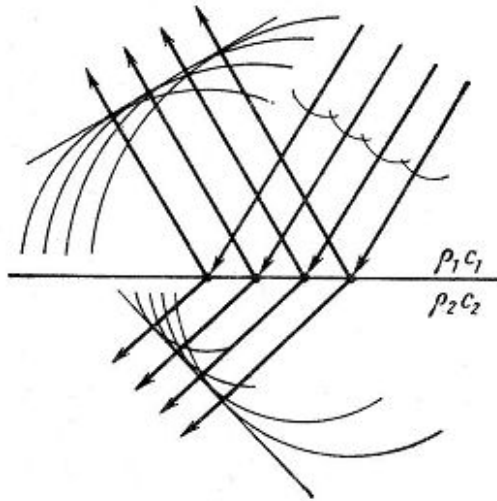


При образовании стоячей волны в идеальной жидкости (из-за наличия сдвига фазы между давлением и колебательной скоростью, равного  $\pi/2$ ) переноса энергии не происходит.



# Отражение и преломление акустических волн

При падении звуковой волны на границу раздела двух сред, акустические свойства которых различны, часть звуковой энергии отражается, а остальная, преломляясь, проникает в смежную среду.



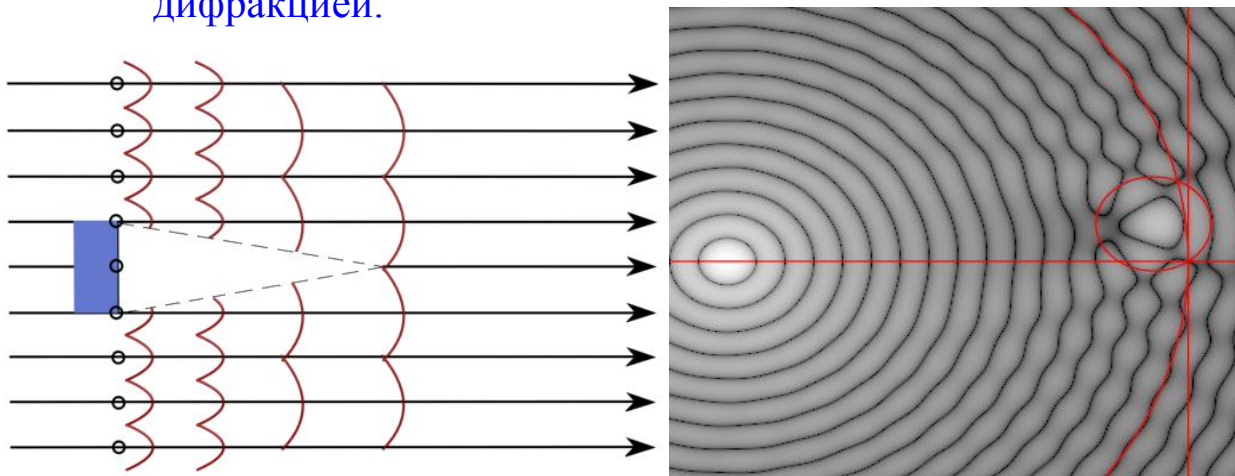
Если поверхность раздела двух сред значительно больше длины падающей на нее волны и является плоской или если размеры неровностей на этой поверхности значительно меньше длины падающей волны, то в этом случае применима лучевая акустика с законами геометрической оптики.

При некоторых значениях угла падения  $\Theta$ , угол преломления будет равен  $\pi/2$  и звуковая волна уже не будет проходить во вторую среду. Дальнейшее увеличение угла  $\Theta$  приведет к обратному отражению в первую среду и наступит полное внутреннее отражение. Предельное значение угла  $\Theta_{\text{ин}}$ , при увеличении которого наступает вышеуказанное явление, определяется из выражения

$$\sin \Theta_{\text{ин}} = \frac{c_1}{c_2} = n$$

# Дифракция акустических волн

Способность акустических волн огибать звуконепропускаемое препятствие называется дифракцией.



При встрече плоской звуковой волны со звуконепропускаемой преградой каждая частица среды, находящаяся в звуковом поле, является источником вторичных элементарных сферических волн, которые, интерферируя, образуют результирующую волну, частично проникающую и за преграду. На каком-то расстоянии от преграды фронт плоской волны восстановится.

Степень дифракции зависит от соотношения размеров препятствия  $d$  и длины волны  $\lambda$ :

$d \gg \lambda$  - за преградой образуется зона акустической тени, дифракция незначительна;

$d = \lambda$  - зона акустической тени исчезает, дифракция проявляется достаточно сильно;

$d \ll \lambda$  - акустическое поле практически не нарушается.

**Пользоваться законами геометрической акустики без учета дифракции можно лишь при размерах препятствий, превышающих  $3\lambda$ .**

# Реверберация

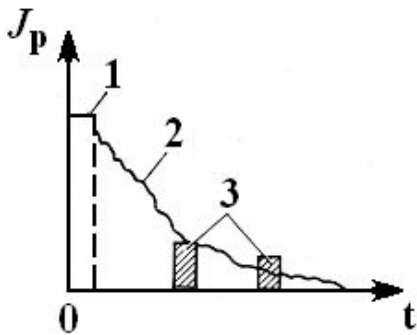
Послезвучание, или постепенно убывающий по силе звук, возникающий при работе гидроакустических систем в активном режиме в результате отражения и рассеяния звука границами раздела сред и слоев, а также различными неоднородностями водной среды, называется реверберацией.

Различают объемную, донную и поверхностную реверберацию.

Под **объемной** подразумевается реверберация, вызванная **рассеянием звука на неоднородностях, насыщающих толщу воды.**

**Поверхностная** реверберация обусловлена **рассеянием звука прежде всего газовыми пузырьками приповерхностного слоя и взволнованной поверхностью моря.**

**Донная** реверберация возникает из-за **рассеяния звука неровностями дна.**



1- излучаемый импульс; 2- реверберация; 3- эхо-сигналы.

Реверберация существенно влияет на работу любых средств активной гидролокации, особенно при горизонтальном и наклонном зондировании, когда, как правило, излучаются импульсы большой мощности. Полезный сигнал может быть принят и выделен, если к моменту его прихода уровень реверберации окажется ниже уровня эхо-сигнала.

Поскольку полезный сигнал изменяется с расстоянием по тому же закону, что и объемная реверберация, снижение уровня объемной реверберации из-за уменьшения акустической мощности не приводит к изменению соотношения сигнал—помеха, а, следовательно, не способствует увеличению дальности действия гидроакустических устройств.

# Затухание звука в водной среде

Распространение акустических колебаний в реальной среде, в частности в морской воде, сопровождается уменьшением их интенсивности.

## ПРИЧИНЫ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА

- 1) расширение площади волновой поверхности с ростом расстояния, пройденного волной (геометрическое затухание):  $J = \frac{P_a}{4\pi r^2}$  ;
- 2) поглощение акустической энергии в морской воде и ее рассеяние газовыми пузырьками и морскими организмами;
- 3) наличие внутреннего трения (вязкости) и теплопроводности в воде вызывает диссипацию (необратимый переход) звуковой энергии;
- 4) при быстрых процессах сжатия и расширения в звуковой волне вследствие перестройки молекулярной структуры воды нарушается термодинамическое равновесие;
- 5) диссоциация (расщепление и восстановление) молекул сернокислого магния, содержащегося в морской воде.

При затухании звуковой волны амплитуда звукового давления убывает с расстоянием по экспоненциальному закону:

$$p_{mx} = p_m e^{-\beta x} \quad J = J_0 e^{-2\beta x} \quad J_0 = \frac{p_m^2}{2\rho}$$

**Коэффициент затухания:**  $\beta = 0,0036 \cdot f^{\frac{3}{2}}$  (на частотах от 16 Гц до 60 кГц)

$$\beta = 0,214 \cdot f + 0,00016 \cdot f^2 \quad (\text{на частотах выше 60 кГц})$$