

Презентация для курса «Волновые
процессы в океане» на тему:
«Звуковые волны в океане»

Травкин В. С.

2019

Литература

- 1) Дж. Лайтхилл, Волны в жидкостях, Кембридж, 1978
- 2) А. И. Коробов и др., Измерение скорости звука в жидкостях, Физический факультет МГУ, 2010
- 3) В.В. Орленок, Морская сейсмоакустика, Калининград, 1997
- 4) В.М. Каменкович, А.С. Монин, Физика океана т.2, Москва, 1978
- 5) Л. М. Бреховских, Акустика океана, Наука, 1974

Содержание

1. Акустическая волна (звук)
2. Волновое уравнение
3. Скорость звука
4. Шумы в океане
5. Поглощение и рассеяние звука в океане
6. Затухание звука в океане
7. Отражение звука от границы «океан-атмосфера»
8. Отражение звука от морского дна
9. Звуковой канал
10. Методы измерения скорости звука в жидкостях
11. Применение гидроакустики

Акустическая волна (звук).

Если в каком-либо участке упругой среды создать деформацию (например, сжать или растянуть среду), то это возмущение не останется неизменным, а благодаря упругости и инерции среды будет передаваться соседним участкам и распространяться с определённой скоростью.

Такие распространяющиеся возмущения называют **акустическими волнами**.

Акустические волны с частотами от 20 до 20000 Гц относятся к слышимым, т.е. звуковым волнам. Волны с частотой ниже 20 Гц называются инфразвуком, а возмущения с частотами от 20 кГц до 10^9 Гц – ультразвуком.

Термин звук относят не только к явлениям в воздухе, связанным со слухом человека, а ко всем акустическим волнам, свойства которых основаны на одних и тех же физических принципах.

Поэтому в широком смысле термины звук и акустическая волна часто не различаются, а скорость распространения акустических возмущений называется скоростью звука.

Волновое уравнение

Условия:

- Распространение звуковых волн в жидкости определяется балансом между ее сжимаемостью и инерцией.
- Линейная теория: возмущения настолько слабы, что в уравнениях движения они являются малыми величинами, произведениями которых можно пренебречь.

Так, например в выражении ускорения элемента жидкости

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) \quad (1)$$

где u – поле вектора скорости du/dt представляет собой локальную скорость изменения u в фиксированной точке, тогда как нелинейный член $u \cdot \nabla u$ указывает, как менялась скорость элемента за счет изменения положения в пространстве.

Применяя II закон Ньютона и пренебрегая вязкими напряжениями,

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p \quad (2)$$

Учитывая сжимаемость жидкости, плотность может меняться в соответствии с уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

Пренебрегая произведениями малых величин в (2) и (3), получим уравнения количества движения:

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla p \quad (4)$$

И неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot u \quad (5)$$

Завихренность (ротор поля скорости) :

$$\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times u \quad (6)$$

Тогда из (4) $\frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} = 0$, т.к. $\text{rot}(\nabla p) = 0$

$$(7)$$

Таким образом, в теории звука конвекция считается пренебрежительно малой.

Вихревая часть поля скорости не должна зависеть от времени (7), остальная часть поля скорости является безвихревой, => может быть представлена как градиент $\nabla \varphi$ от потенциала скорости φ .

Учитывая сказанное, получим $u = \nabla \varphi$

$$(8)$$

Тогда из (4) и (8) следует, что

$$p - p_0 = -\rho_0 \partial \varphi / \partial t \quad (9)$$

Из (5) и (8) получим выражение для скорости изменения плотности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla^2 \varphi \quad (10)$$

Предположим, что $p = p(\rho)$ и линеаризуя ее разложением в ряд Тейлора в окрестности $\rho - \rho_0$:

$$p = p(\rho_0) + (\rho - \rho_0) p'(\rho_0) \quad (11)$$

Тогда получим

$$\frac{\partial p}{\partial t} = p'(\rho_0) \partial \rho / \partial t \quad (12)$$

Подставляя в левую часть (9), а в правую (10) выводим уравнение:

$$\partial^2 \varphi / \partial t^2 = c^2 \nabla^2 \varphi \quad (13)$$

Где постоянная c (с размерностью скорости) определяется:

$$c^2 = p'(\rho_0) \quad (14)$$

(13) Является «волновым уравнением», типичным для любого явления с сохранением энергии, в т.ч. и для распространения волн через однородную среду с единственной возможной скоростью волны c , не зависящей ни от формы волны, ни от направления ее распространения

Скорость звука.

Звук – продольные упругие волны, и скорость его распространения определяется соотношением

$$C_{\text{зв}} = \frac{\sqrt{\chi}}{\rho_{\omega}} = \sqrt{\frac{1}{K_s \rho_{\omega}}} \quad (1)$$

ρ_{ω} – плотность морской воды, χ – адиабатический модуль объемной упругости, $K_s = \chi^{-1}$ – адиабатический коэффициент сжимаемости морской воды

Величины K_s и плотность ρ_{ω} зависят от T , S , P .

Тогда скорость звука будет функцией $C_{\text{зв}} = C_0 + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{\text{СТР}}$ (2)
(Формула Фрая), в которой $C_0 = 1449,3$ м/с – скорость звука при $T = 0$ °C, $S = 35\text{‰}$ и нормальном атм. давлении.

$\Delta C_T, \Delta C_S, \Delta C_P, \Delta C_{\text{СТР}}$ – поправки на изменение температуры, солёности, давления и их нелинейное взаимодействие

(2) Справедлива для интервалов: $-3^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$, $33,1\text{‰} < S < 36,6\text{‰}$,
 $1,03 \text{ кг/см}^2 < P < 10^3 \text{ кг/см}^2$

$$\Delta T = \uparrow 1^{\circ}\text{C} = \uparrow 3 \text{ м/с} \quad \Delta S = \uparrow 1 \text{ ‰} = \uparrow 1,2 \text{ м/с}$$

$$\Delta P = \uparrow 1 \text{ атм} = \uparrow 0,2 \text{ м/с}$$

Значения скорости звука в океане ($C_{зв}$) = 1440 до 1540 м\с

• Шумы в океане.

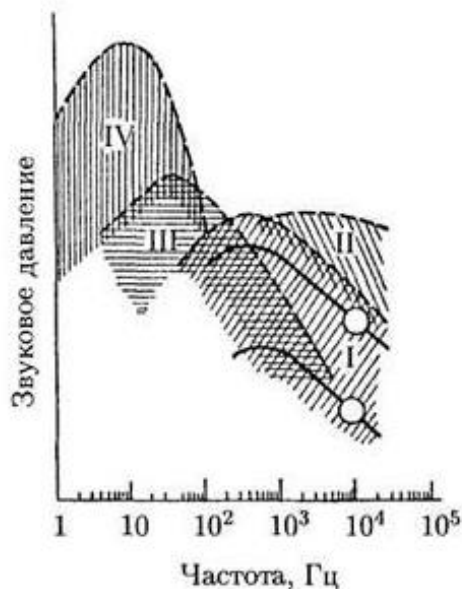


Рис. 11.1. Спектрограмма шумов моря различного происхождения: I — шумы ветрового волнения; II — шумы дождя и снежных зарядов; III — шумы судоходства; IV — шумы от землетрясений и турбулентных движений на границе атмосферы и воды

I- шумы ветрового происхождения
II – шумы дождя и снежных зарядов
III - шумы судоходства
IV – шумы от землетрясений и турбулентных движений на границе атмосферы и воды

Кроме того, звуки издают и живые организмы – креветки щелкают и ревут, свистят и даже чирикают белуги, лает ставрида Черного моря, а сельдь пищит и мурлыкает.

Поглощение и рассеяние звука в океане.

В процессе распространения звука в океане звуковая энергия **поглощается** и **рассеивается**.

Поглощение приводит к экспоненциальному убыванию амплитуды звукового давления $p(R)$ при увеличении расстояния R [км] от излучателя:

$$p(R) = p(0)e^{-\beta R}$$

где β – коэффициент поглощения [Нп/км] и является $f(T)$;

Причины поглощения: пузырьки, морские организмы с газовыми включениями, дно.

Ослабление звука по мере распространения его в океане обусловлено не только процессом поглощения, но и процессом рассеяния.

Закон рассеяния звука в море имеет вид:

$$p(R) = p(0)e^{-\chi R}$$

где χ – коэффициент рассеяния (измеряется в Нп/км)

Причины рассеяния: воздушные пузырьки (как продукт жизнедеятельности планктона), при волнении и штормах, мелкомасштабные T неоднородности, шероховатость м. поверхности, флуктуации показателя преломления звуковых лучей.

Затухание звука в океане.

Совместное поглощение и рассеяние звука приводит к экспоненциальному убыванию амплитуды по мере удаления от излучателя – **затуханию**:

$$p(R)=p(0)e^{-KR} \quad \text{где } K \text{ – коэффициент затухания (Нп/км)}$$

Согласно экспериментальным данным и теоретическим расчетам затухание звука зависит от частоты звуковых колебаний: звук низких частот затухает слабее, т.е. распространяется дальше, чем звук высоких широт. Затухание акустических волн в морской воде сильнее, чем в пресной.

Отражение звука от границы «океан – атмосфера».

- Отражение звука от границы «океан-атмосфера» является **мягким** – происходит смена фазы звукового сигнала на противоположную, в результате чего результирующее звуковое давление на границе раздела вода-воздух **равно нулю** (граница вода-воздух является полностью отражающей поверхностью).
- Взволнованность поверхности и наличие большого количества пузырьков воздуха приводит к увеличению затухания акустических волн.

Отражение звука от морского дна

- Дно океанов и морей отражает звуковые волны по-разному и его отражающие свойства характеризуют **коэффициентом отражения** – отношением звукового давления в отраженной волне к звуковому давлению в падающей волне.
- В океане наиболее важное значение имеет не абсолютное значение $C_{зв}$, а профиль кривой $C_{зв}(z)$, т. е. вид вертикального распределения $C_{зв}$, соотношение значений $C_{зв}$ у дна, у поверхности океана. Профиль $C_{зв}(z)$ по существу и определяет условия распространения звука в океане.

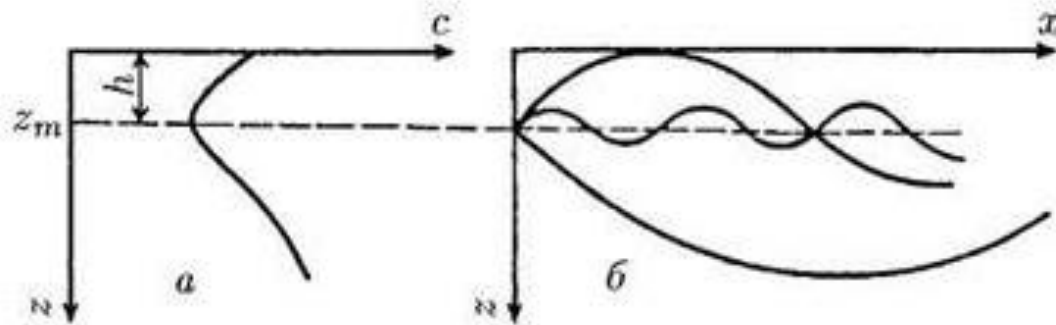


Рис 11.2. Распределение по вертикали скорости звука, наиболее часто встречающееся в глубоководных районах морей и океанов (а), и формирование звукового канала (б)

Звуковой канал

- Для глубоководных районов океана типичен профиль $C_{зв}(z)$ вида, т.е. профиль с минимумом, расположенным на некоторой глубине z_m . Вверх от z_m скорость $C_{зв}$ растет вследствие роста температуры T , вниз от z_m величина $C_{зв}$ увеличивается из-за роста давления P . Наличие минимума $C_{зв}$ приводит к формированию интереснейшего явления — **возникновению подводного звукового канала**.
- Создаются условия, благоприятные для дальнего распространения звука, — звуковые волны не рассеиваются на поверхности океана и не поглощаются в донном грунте. Из факторов, ослабляющих звуковое давление, остается только поглощение в морской воде.
- Для низких частот, для которых поглощение в воде невелико, дальность распространения звука может составлять несколько тысяч километров. Звук спокойно мог бы обогнуть весь земной шар, если бы ему не мешали материки.
- Почти повсеместное существование в Мировом океане звукового канала было использовано для создания гидроакустической системы спасения людей, попавших в катастрофу на море (СОФАР).

- Ход звуковых лучей в подводном звуковом канале может быть рассчитан с помощью лучевой теории, в основе которой лежит предположение, что звуковая энергия в среде распространяется вдоль некоторых линий — лучей. Если излучатель поместить на оси звукового канала, то при определенных условиях лучи, вышедшие из этого источника под разными углами скольжения, снова соберутся в одну точку, т. е. сфокусируются. Таким образом, подводный звуковой канал действует на звуковые лучи как собирающая линза.

Методы измерения скорости звука в жидкостях

- Резонансные методы
- С помощью интерферометра
- Импульсные методы
- Оптические методы
- Фазовые методы

Точность методов: 10^{-5} - 10^{-7} , однако наиболее точными являются импульсно-фазовые методы

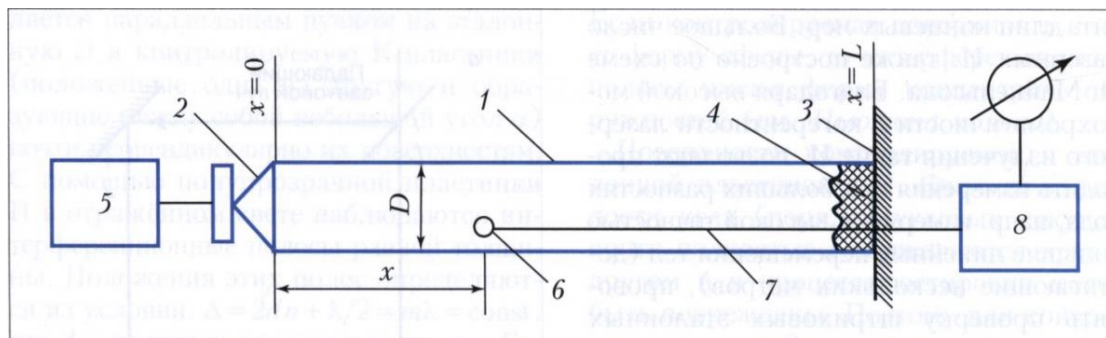


Рис. 1. Схема акустического интерферометра: 1 – акустическая труба; 2 – излучатель звука; 3 – эталонный отражатель; 4 – образец материала; 5 – генератор; 6 – микрофон; 7 – штанга; 8 – усилитель.

Применение гидроакустики

Звук является единственным возможным средством связи под водой (для этих целей пользуются звуковыми частотами от 300 до 10000 гц и ультразвуками от 20000 гц и выше).

Наиболее существенными применениями гидроакустики являются:

- Военные задачи
- Морская навигация
- Звукоподводная связь
- Рыбопоисковая разведка
- Океанологические исследования
- Освоение богатств дна Мирового океана
- Тренировка морских животных