

3. Использование сложных сигналов при создании гидроакустических систем связи // Материалы Международной научно-практической конференции «Научные исследования и их применение Современное состояние и пути развития '2012». – Одесса, 2012. – Вып. 3. Т. 1. – 103 с.
4. Экспериментальные исследования по управлению процессом модового распространения сигнала в мелком море для систем дистанционного мониторинга морского шельфа // Материалы четырнадцатого Международного научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – Донецк-Таганрог 2013. – Т. 2. – С. 105-107.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Бутенко.

Кравчук Денис Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: denik545@ya.ru; 347928, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. «Е»; тел.: 88634371791; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

Kravchuk Denis Aleksandrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: denik545@ya.ru; 44, Nekrasovsky, building E, Taganrog, GSP 17A, 347928, Russia; phone: +78634371791; the department of hydroacoustics and medical engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 534.222

А.П. Волощенко, С.П. Тарасов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛН В ЦЕЛЯХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ПРОСТРАНСТВ

Исследуются вопросы распространения акустических волн звукового диапазона вблизи границ раздела сред с существенным различием акустических импедансов. Показаны особенности волновых процессов, происходящих на границе раздела “вода-воздух”, связанные с влиянием неоднородных волн. Подробно рассмотрены свойства и параметры плоской неоднородной волны. Приведены результаты математического моделирования коэффициентов прохождения через данную границу для точечного источника, позволяющие учесть вклад неоднородной компоненты. Произведено сопоставление теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями. Показано, что чем ниже частота излучения источника и чем ближе он расположен к границе раздела “вода-воздух”, тем выше акустическая прозрачность данной границы.

Неоднородная плоская волна; граница раздела вода-воздух; коэффициент прохождения; сферическая волна.

A.P. Voloshchenko, S.P. Tarasov

STUDY OF EVANESCENT WAVES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF WATER AREAS

Investigate problems in the propagation of acoustic waves of a sound range near the boundaries of media with a significant difference in acoustic impedance. The features of the wave processes occurring at the water-air interface, due to the influence of evanescent waves. Considered in detail the properties and parameters of an inhomogeneous plane wave. The results of mathematical modeling of the transmission coefficients through this border for a point source into account the contribution inhomogeneous components. A comparison of theoretical calculations and experimental studies. It is shown that than the frequency of radiation of a source is lower and the closer it is located to water-air interface, the acoustic transparency of this border is higher.

Inhomogeneous plane wave; water-air interface; transmission coefficient; spherical wave.

Согласно лучевой теории в случае точечного источника [1], коэффициент прохождения (как по давлению, так по интенсивности) плоских акустических волн сквозь границу раздела “вода-воздух” незначителен и не зависит от параметров источника, а определяется только свойствами сред. Его можно легко рассчитать, используя формулу Френеля (1).

$$W = \frac{2m}{m + \sqrt{n^2 + (n^2 - 1)\text{ctg}^2\theta}}, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления второй среды относительно первой; m – отношение плотностей сред; θ – угол скольжения падающей волны.

В данном случае вода является акустически жесткой средой, а воздух акустически мягкой средой. Решение обратной задачи, т.е. нахождение коэффициента прохождения через границу раздела “воздух-вода”, предсказывает почти 100 % проникновение акустических волн сквозь данную границу. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования прохождения звука через границу раздела, в основном, сосредотачивались на изучении акустического поля в воде, которое образуется в воздухе с помощью воздушных источников. Практический интерес был связан с изучением шумов, создаваемых вертолетами, винтовыми самолетами, сверхзвуковым транспортом и т.д. Исследовались способы акустического обнаружения и измерения дальности до самолета с подводной платформы, а также возможное негативное влияние данных шумов на морскую флору и фауну. Обратным процессам, таким как формирование акустического поля в воздухе благодаря мощным подводным источникам, уделялось гораздо меньше внимания.

Плоская волна является идеализацией и в природе почти не встречается. Гораздо чаще на практике встречаются цилиндрическая и сферическая волны, которые, в свою очередь, можно представить как суперпозицию плоских волн. Однако, суммирование только однородных плоских волн недостаточно, также необходимо учитывать неоднородную плоскую волну (рис. 1). Исследуем подробнее особенности и свойства данной волны [1].

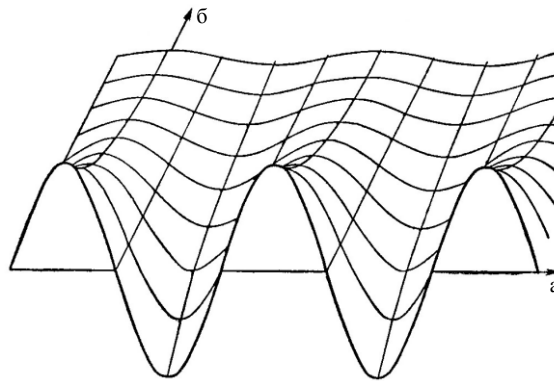


Рис. 1. Двухмерный профиль неоднородной волны: a – направление быстрого изменения фазы (направление бега волны); b – направление быстрого изменения амплитуды [1]

Для простоты рассмотрим сначала плоскую задачу, считая, что движение частиц происходит в плоскости xz и не зависит от координаты y . Тогда уравнение Гельмгольца

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (3)$$

где k – волновое число; и p – давление волны в среде.

Будем искать решение в виде $p = e^{i\xi x} f(z)$, считая, что $\xi > k$. Подставляя в (3), получим уравнение для $f(z)$:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} - (\xi^2 - k^2) f = 0,$$

где $\xi^2 - k^2 > 0$.

Решая это уравнение, находим

$$f = e^{-\alpha z},$$

где положено $\alpha = \sqrt{\xi^2 - k^2}$. Очевидно, всегда $\alpha < \xi$. Таким образом, искомая неоднородная волна имеет вид

$$p = \exp(i\xi x - \alpha z), \quad (4)$$

причем $\xi^2 - \alpha^2 = k^2$.

В отличие от однородных плоских волн, эту волну нельзя представить как одномерную: ее фронты совпадают с плоскостями $x = const$, но амплитуда колебаний вдоль фронтов не постоянна, а меняется экспоненциально. След волны на оси z есть синфазное колебание, экспоненциально убывающее или нарастающее вдоль оси в зависимости от знака α . Вся волна перемещается в направлении оси x , перпендикулярно к фазовым фронтам. Однородную плоскую волну можно считать предельным случаем неоднородной волны при $\alpha \rightarrow 0$. Скорость волны есть $\gamma = \frac{\omega}{\xi} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 + \alpha^2}}$. Она может быть как угодно мала, если только коэффициент экспоненты α достаточно велик по абсолютной величине, т.е. если амплитуда колебания достаточно быстро меняется вдоль оси z . След волны на оси, проведенной по любому другому направлению, будет синусоидальным по фазе и экспоненциально меняющимся по амплитуде. Ось x – направление быстрого изменения фазы (при постоянной амплитуде). Ось z – направление быстрого изменения амплитуды (при постоянной фазе). Эти два направления взаимно-перпендикулярны.

Очевидно, неоднородная волна не может существовать во всем неограниченном пространстве, так как ее амплитуда растет в одну сторону оси z бесконечно. Если α положительно, то в полупространстве $z > 0$ может существовать волна $\exp(i\xi x - \alpha z)$, а в полупространстве $z < 0$ – волна $\exp(i\xi x + \alpha z)$. В слое, заключенном между двумя плоскостями, параллельными плоскости $z = 0$, могут существовать обе неоднородные волны.

Неоднородная плоская волна не является чисто продольной волной: скорость v частиц имеет компоненту, перпендикулярную к направлению распространения волны. В самом деле, из (4) следует

$$v_x = \frac{\xi}{\rho\omega} p, \quad v_z = \frac{i\alpha}{\rho\omega} p.$$

Интегрируя по времени, найдем компоненты смещения частиц:

$$u_x = \frac{i\xi}{\rho\omega^2} p, \quad u_z = \frac{-\alpha}{\rho\omega^2} p.$$

Переходя к вещественной записи, имеем

$$u_x = -e^{-\alpha} \frac{\xi}{\rho\omega^2} \sin(\xi x - \omega t), \quad u_z = -e^{-\alpha} \frac{\alpha}{\rho\omega^2} \cos(\xi x - \omega t).$$

Исключая множители, содержащие время, найдем уравнение траектории частиц:

$$\frac{u_x^2}{(e^{-\alpha} \xi / \rho\omega^2)^2} + \frac{u_z^2}{(e^{-\alpha} \alpha / \rho\omega^2)^2} = 1.$$

Частицы в неоднородной волне движутся по эллипсам с полуосями $e^{-\alpha} \xi / \rho\omega^2$ и $e^{-\alpha} \alpha / \rho\omega^2$ с центрами в местах невозмущенного положения частиц. Большая ось лежит в направлении быстрейшего изменения фазы, т. е. в направлении распространения волны; малая ось – в направлении быстрейшего изменения амплитуды.

Неоднородную волну, бегущую по любому направлению, получим, формально заменяя в выражении для однородной плоской волны вещественный волновой вектор \mathbf{k} комплексным волновым вектором $\xi + i\alpha$:

$$p = \exp(i(\xi + i\alpha)r) = \exp(i\xi r - \alpha r). \quad (5)$$

Так как единственное требование, налагаемое на гармоническую волну, — это удовлетворение уравнению Гельмгольца (2), то, подставляя (5) в уравнение Гельмгольца (2), найдем условие, которому должны удовлетворять векторы ξ и α :

$$(\xi + i\alpha)^2 = k^2.$$

Приравнивая отдельно вещественные и мнимые части слева и справа, получим

$$\xi^2 - \alpha^2 = k^2, \quad \xi\alpha = 0.$$

При выполнении этих условий (5) есть неоднородная плоская волна. Направление быстрейшего изменения фазы (направление распространения волны) совпадает с вектором ξ ; в этом направлении амплитуда волны остается постоянной. Направление быстрейшего изменения амплитуды совпадает с вектором α ; в этом направлении фаза волны остается постоянной. Уравнения фронтов имеют вид $\xi r = \text{const}$. Векторы ξ и α взаимно-перпендикулярны. Если совместить оси x и z с векторами ξ и α , то вернемся к представлению неоднородной волны (4).

Как было отмечено выше, неоднородная волна бежит вдоль плоскости и экспоненциально убывает при удалении от плоскости. Чем больше ξ , т.е. чем меньше длина волны распределения давления на плоскости, тем, при данной частоте, быстрее спадает давление при удалении от плоскости. На больших расстояниях вклад неоднородных волн незначителен, но вблизи от поверхности излучателя их влияние может доминировать.

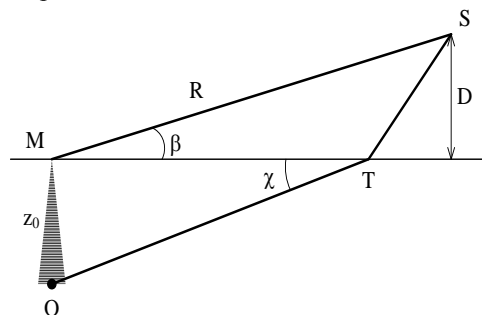


Рис. 2. Два пути, которыми излученная волна проходит от излучателя O в приемник S

Чтобы упростить описание волновых процессов, происходящих на границах раздела и связанных с ними вычислений, вместо волновой теории, применяют упрощения лучевой теории [1]. Однако в работе [2], а потом и [3] теоретически доказано, что использование лучевой теории для сферических и цилиндрических волн имеет ряд ограничений, связанных с местом расположения источника (приемника) относительно границы раздела. При прохождении акустических волн из акустически жесткой среды в акустически мягкую среду (коэффициент преломления больше единицы), если излучатель находится на расстоянии, меньшем длины волны от границы раздела, помимо акустической волны, распространяющейся по законам геометрической акустики, необходимо учитывать появляющуюся неоднородную компоненту. В силу своих физических свойств, описанных выше, неоднородная волна быстро затухает, но на малых дистанциях она может оказывать существенное влияние на процесс прохождения образовавшейся преломленной волны. Путь прохождения акустической волны через границу раздела “вода-воздух” с учетом влияния неоднородной волны показан на рис. 2. Отрезок OTS соответствует обычному лучу, построенному по законам геометрической оптики; отрезок OMS соответствует распространению неоднородной волны OM в воде с последующей ее трансформацией в распространяющуюся в воздухе волну MS.

Обратимся к результатам моделирования для монополя, сделанным на основе работ [2] (рис. 3) и [3] (рис. 4). На рис. 3 представлена зависимость коэффициента прохождения по давлению от излучаемой частоты и глубины расположения источника (угол скольжения 50° , высота расположения микрофона 0.15 м). На рис. 4 представлено отношение энергии, прошедшей в воздух ко всей излученной источником энергии.

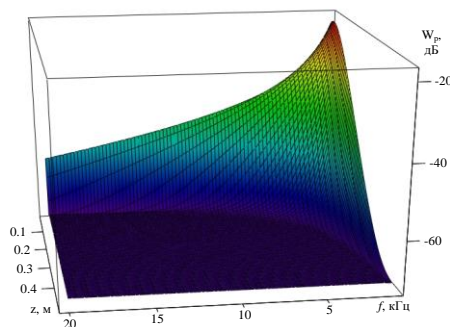


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения по давлению

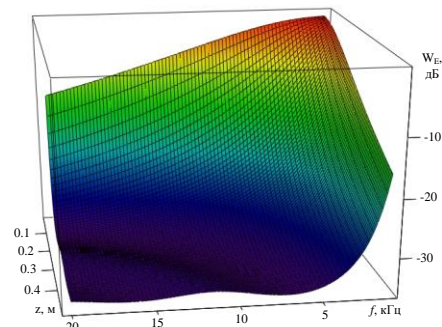


Рис. 4. Отношение энергий

Для проверки существования эффекта аномальной прозрачности и оценки достоверности математических расчетов [2, 3] была проведена серия экспериментов [4, 5] по измерению коэффициентов прохождения через границу раздела “вода-воздух”.

На графиках представлены зависимости коэффициента прохождения по давлению для сферического излучателя (диаметр 50 мм):

- ◆ в диапазоне глубин 2–30 см для частоты излучения источника 10 кГц (рис. 5);
- ◆ в диапазоне частот 1–20 кГц для глубины расположения источника 15 см (рис. 6).

Экспериментально полученные значения обозначены крестиками. Кривая – усредненная экспериментальная зависимость коэффициента прохождения по давлению от частоты или глубины.

Из графиков (рис. 3–6) видно, что полученные теоретические и экспериментальные зависимости существенно расходятся с лучевой теорией [1], и имеют частотно- и глубинно-зависимый характер. Чем ниже частота излучения источника и чем ближе он расположен к границе раздела сред, тем выше коэффициент прохождения границы раздела “вода-воздух”. Этот вывод справедлив как для давления, так и для энергии. Кривые зависимости (рис. 3–6) имеют схожий характер, а отличаются только крутизной нарастания и количественными значениями. Экспериментальные результаты качественно совпадают с теоретическими расчетами [2, 3]. Исследования показали, что в определенных условиях, неоднородная компонента вносит существенный вклад в прохождение звука через границу раздела “вода-воздух”. Чем ниже частота излучателя и его глубина относительно границы раздела, тем больше коэффициент прохождения по давлению.

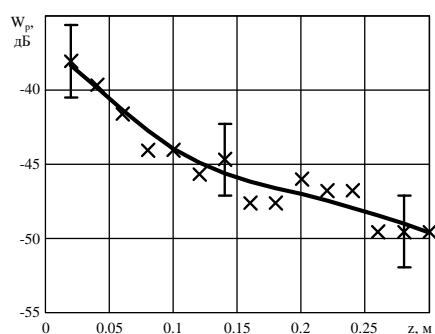


Рис. 5. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от глубины

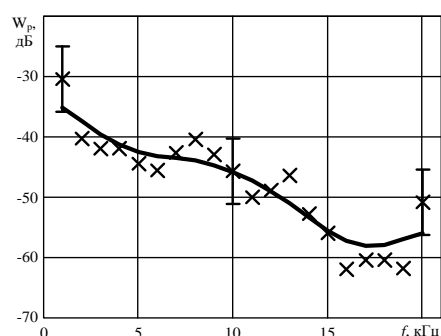


Рис. 6. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от частоты

Исследование зависимости коэффициента прохождения из воды в воздух в низкочастотном диапазоне может иметь важные следствия в целом ряде фундаментальных и прикладных проблем. Возрастание прозрачности границы раздела “вода-воздух” требует переоценки возможности экологического мониторинга данного участка среды, а также обнаружения подводных источников, без погружения в воду и изучения физических процессов, происходящих под водой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Исакович М.А.* Общая акустика – М.: Наука, 1973. – 496 с.
2. *Бреховских Л.М.* Отражение и преломление сферических волн // УФН. – 1949. – Т. 38, № 1. – С. 1-41.
3. *Годин О.А.* Прохождение низкочастотного звука из воды в воздух // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 3. – С 353-361.
4. *Волощенко А.П., Тарасов С.П.* Эффект аномальной прозрачности границы раздела “жидкость-газ” для звуковых волн // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 2. – С. 186-192.
5. *Волощенко А.П., Тарасов С.П.* Влияние неоднородных волн на прохождение низкочастотного звука через границу раздела “вода-воздух” // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 9 (134). – С. 201-206.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Родионов.

Волощенко Александр Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vigcorp@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371795; аспирант.

Тарасов Сергей Павлович – e-mail: tsp-47@mail.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Voloshchenko Alexander Petrovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: vigcorp@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; postgraduate student.

Tarasov Sergei Pavlovich – e-mail: tsp-47@mail.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; head of department; dr.of eng. sc.; professor.

УДК 551.463.22

В.Н. Лобанов, И.И. Микушин, Г.Н. Серавин

**О РЕАЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ДИСТАНЦИОННОГО МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ ВРСЗ В МОРЕ**

Экологический мониторинг водных бассейнов предполагает изучение гидрофизических параметров водной среды. Дистанционные методы измерения вертикального распределения скорости звука в океане продолжают привлекать пристальное внимание исследователей. Усилия ученых направлены на разработку методов повышения точностных характеристик. В работе производится оценка точности определения времён прихода принятых сигналов, требуемой для решения обратной задачи восстановления в море искомого ВРСЗ в дистанционной импульсной аппаратуре, основанной на прямоугольной бистатической схеме зондирования и приёме акустических сигналов, отражённых от относительно крупных единичных биологических рассеивателей.

Скорость звука; дистанционный метод; акустический рассеиватель.

V.N. Lobanov, I.I. Mikushin, G.N. Seravin

**ABOUT REALIZATION OF THE REMOTE PULSE METHOD
OF MEASURING THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOUND VELOCITY
IN THE SEA**

Environmental monitoring of water bodies involves the study of hydro-physical parameters of the water environment. Remote sensing methods for measuring the vertical distribution of the velocity of sound in the ocean continues to attract attention of researchers. Research efforts aimed at developing methods to improve the accuracy characteristics. The work is assessed the accuracy of the arrival times of the received signals, required to solve the inverse problem of recovering the sea VRSZ sought to distance the pulse of equipment, based on a rectangular pattern bistatic sensing and receiving acoustic signals reflected from the relatively large single biological scatterers.

Sound velocity; remote method; acoustic lens.

Дистанционное акустическое измерение вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в морской среде является актуальной задачей экологического мониторинга. Однако вопросы принципиальной возможности реализации импульсных дистанционных методов до сих пор не рассматривались.

Известные дистанционные акустические методы измерения ВРСЗ в море основаны на приёме сигналов, рассеянных от биологических организмов – зоопланктона, состоящего в основном из большого количества ракообразных, размерами 0.1...1.0 см, или более крупных единичных рассеивателей (рыбок и креветок) длиной более 1 см. Так как размеры зоопланктонных организмов обычно меньше длины волны излучаемого акустического сигнала $l < \lambda$, то их рассеивающая способ-