Исследование неоднородных волн вблизи границ раздела сред

А.П. Волощенко, С.П. Тарасов

Вопросы исследования волновых процессов, как вблизи границы раздела жидкость-газ, так и на ней самой, продолжают оставаться актуальными и представляют большой фундаментальный и прикладной интерес. В особенности, это касается вопросов распространения и прохождения звуковых волн через границу раздела с существенным различием акустических импедансов соприкасающихся сред. В данном случае особым практическим интересом обладает граница вода-воздух.

Согласно общепринятому и широко распространенному мнению [1, С. 123-201], коэффициент прохождения (как для интенсивности, так для давления) плоских акустических волн через границу раздела вода-воздух очень мал и определяется только свойствами сред и не зависит от параметров самого источника. Его можно легко найти по формуле Френеля (1).

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

где m – отношение плотностей соприкасающихся сред; n – коэффициент преломления второй среды относительно первой; 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. Экспериментальные и теоретические исследования прохождения звука через данную границу раздела, ограничивались изучением только акустического поля в воде, которое образуется благодаря воздушным источникам. Практический интерес состоял в изучении шумов винтовых самолетов, вертолетов, сверхзвукового транспорта и т.д. Изучались методы акустического обнаружения и измерения дистанции до воздушной цели с подводной станции, а также возможное негативное воздействие шумов на морскую флору и фауну. В то же время образованию акустического поля в воздухе вследствие воздействия мощных подводных источников, уделялось гораздо меньше внимания.

Плоская волна является идеализацией и в природе почти не встречается. Гораздо чаще, на практике приходится иметь дело с цилиндрическими и сферическими волнами, которые в свою очередь можно представит как суперпозицию плоских волн. Однако, суммирования только однородных плоских волн недостаточно, также необходимо учитывать неоднородную плоскую волну (рис. 1). Исследуем подробнее особенности и свойства данной волны [1, С. 91-95].

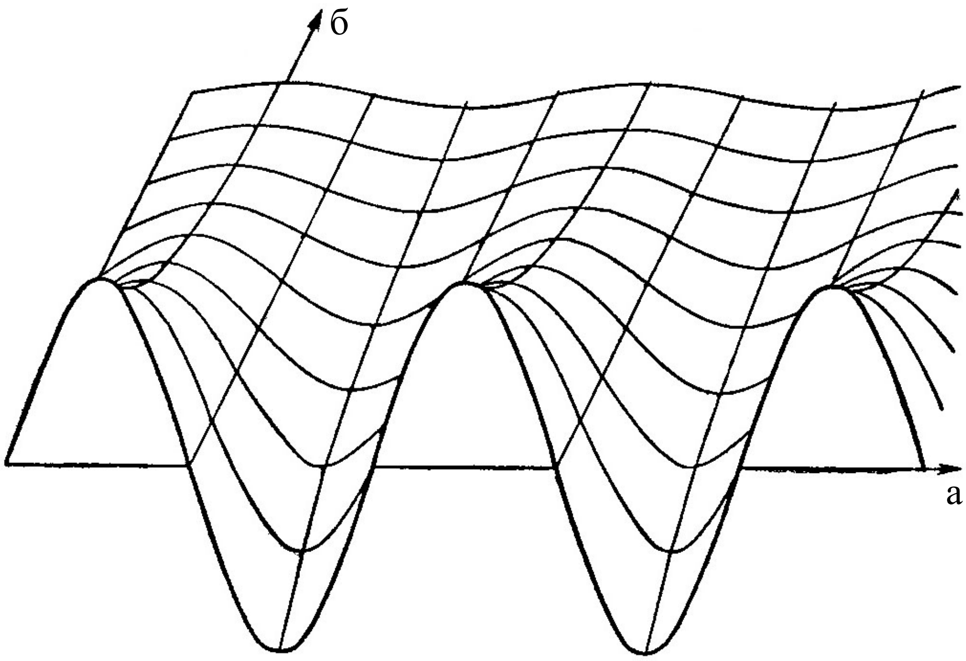

Рис. 1 – Двухмерная проекция на плоскость неоднородной волны. **а** – вектор быстрейшего изменения фазы, **б** - вектор быстрейшего изменения амплитуды [1]

Для наглядности рассмотрим задачу в одной плоскости. Будем считать, что движение частиц происходит только в плоскости *xz* и не зависит от координаты *y*. Тогда уравнение Гельмгольца

$$\Delta p + k^2 p = 0, \tag{2}$$

где *p* – давление волны в среде; *k* – волновое число, можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0. \tag{3}$$

Найдем решение в виде $p = e^{i\xi x} f(z)$, при условии, что $\xi > k$. Подставляя в (3), найдем уравнение для $f(z)$:

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

где $\xi^2 - k^2 > 0$.

Решая уравнение, найдем

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

где $\alpha = \sqrt{\xi^2 - k^2}$. Очевидно, что всегда $\alpha < \xi$. Отсюда следует, что рассматриваемая неоднородная волна имеет вид

$$p = \exp(i\xi x - \alpha z). \tag{4}$$

Фронты однородной плоской волны совпадают с плоскостями $x = const$, однако амплитуда колебаний вдоль фронтов изменяется по экспоненциальному закону. Поэтому, в отличие от однородных плоских волн, ее нельзя рассматривать только в одной конкретной плоскости. Проекция волны на ось *z* есть синфазное колебание, которое возрастает или убывает по экспоненциальному закону вдоль оси. Вся волна распространяется в направлении оси *x*, т.е. перпендикулярно к фазовым фронтам. Скорость волны равна $\gamma = \dfrac{\omega}{\xi} = \dfrac{\omega}{\sqrt{k^2 + \alpha^2}}$. Проекция волны на оси, проведенные в любом другом направлении, будет экспоненциально меняющейся по амплитуде и синусоидальной по фазе.

Уравнение (4) можно представить в том же виде, что и для обычный однородной волны. Пологая что $k_x = \xi$, $k_z = i\alpha$. Также если использовать мнимый угол скольжения $\theta = i\psi$, то согласно соотношению $k\cos\theta = \xi = kch\psi$, для неоднородной волны можно получить те же формулы. Тогда соответственно $k\sin\theta = i\alpha = iksh\psi$. Из выше сказанного следует, что неоднородную волну можно представить как волну с комплексным волновым вектором, который образует с рассматриваемой плоскостью мнимый угол скольжения.

Амплитуда неоднородной волны растет в направлении оси z бесконечно, поэтому волна не может существовать во всем неограниченном пространстве. Если α положительно, то в полупространстве $z > 0$ может распространяться неоднородная волна $\exp(i\xi x - \alpha z)$, а если $z < 0$ то, неоднородная волна $\exp(i\xi x + \alpha z)$. Между плоскостями ($z = 0$) существуют оба типа волн. Неоднородная плоская волна не является только продольной волной: скорость υ частиц имеет компоненту, которая перпендикулярна к направлению распространения волны. В самом деле, из (4) следует

$$\upsilon_x = \frac{\xi}{\rho\omega} p\,,\ \upsilon_z = \frac{i\alpha}{\rho\omega} p\,.$$

Проинтегрировав по времени, найдем компоненты смещения частиц:

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

Перейдем к вещественной записи

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

Исключив множители, содержащие время, найдем уравнение траектории движения частиц:

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

Частицы в неоднородной волне перемещаются по эллиптическим траекториям с полуосями $e^{-\alpha z}\xi / \rho\omega^2$ и $e^{-\alpha z}\alpha / \rho\omega^2$. Центры полуосей расположены в точках невозмущенного расположения частиц. Малая ось направлена в сторону скорейшего изменения амплитуды. Большая ось направлена в сторону скорейшего изменения фазы, т.е. в сторону бега волны.

Чтобы получить неоднородную волну, бегущую в любом из направлений, заменим в уравнении для однородной плоской волны действительный волновой вектор ***k*** на комплексную сумму $\xi + i\alpha$, тогда

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

Подставив (5) в уравнение (2), найдем условие, которому обязаны удовлетворять векторы ξ и α:

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

Приравняем по отдельности мнимые и вещественные части справа и слева, найдем

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

Если рассмотренные условия выполняются, то (5) можно считать уравнением неоднородной плоской волной. Направление бега волны (вектор скорейшего изменения фазы) совпадает с вектором ξ – амплитуда волны неизменна. Вектор скорейшего изменения амплитуды совпадает с вектором α – фаза волны постоянна. В данном случае векторы ξ и α перпендикулярны друг другу, а уравнения для фронтов принимают вид $\xi r = const$.

Как отмечалось выше, неоднородная волна распространяется вдоль плоскости и убывает по экспоненте при увеличении расстояния до плоскости. Чем больше ξ, т.е. чем меньше длина волны, тем, при неизменной частоте, интенсивней идет спад давления при удалении от плоскости. На больших дистанциях вклад неоднородных волн в акустическое поле незначителен, но вблизи от поверхности излучателя их влияние может преобладать.

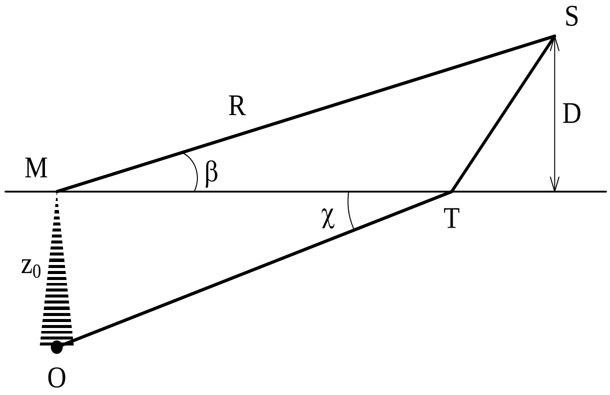

Рис. 2. Пути, по которым излученная волна распространяется от излучателя O в приемник S

Для упрощения описания и расчета волновых процессов, происходящих на границах раздела, вместо волновой теории, применяют допущения лучевой теории [1, С. 123-201]. Однако в работах [2-5] теоретически показано, что лучевая теория для сферических и цилиндрических волн имеет ряд ограничений, обусловленных местом расположения источника относительно границы раздела. Если излучатель заглублен на расстояние меньшее длины волны от границы раздела то, при прохождении акустической волны из акустически жесткой среды в акустически мягкую среду, кроме волны, распространяющейся по законам геометрической акустики, необходимо учитывать вклад неоднородной компоненты. Процесс преломления акустической волны через границу раздела вода-воздух с учетом воздействия неоднородной волны отображен на рис. 2. Отрезок OTS соответствует пути, пройденному волной по законам геометрической оптики. Отрезок OMS соответствует пути OM, пройденному неоднородной волной в воде, с дальнейшей ее трансформацией и распространением в воздухе по отрезку MS.

Обратимся к расчетам для монополя, сделанным в работе [3]. Изучим зависимости коэффициента прохождения по давлению для границы раздела вода-воздух от 1) заглубления источника, 2) его частоты излучения, 3) высоты расположения приемника в воздухе и 4) угла скольжения (рис. 3-4).

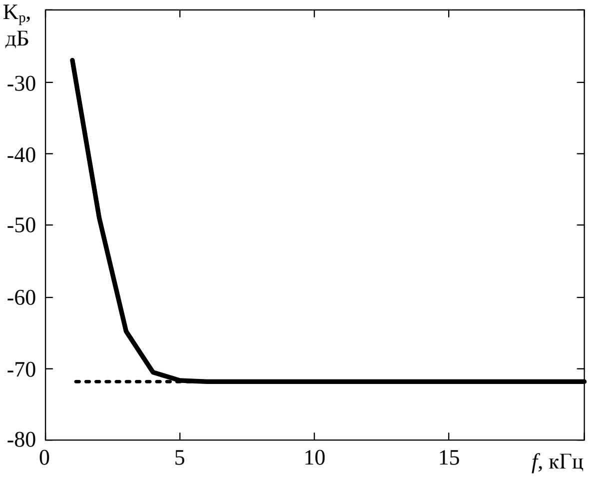

Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от частоты излучения

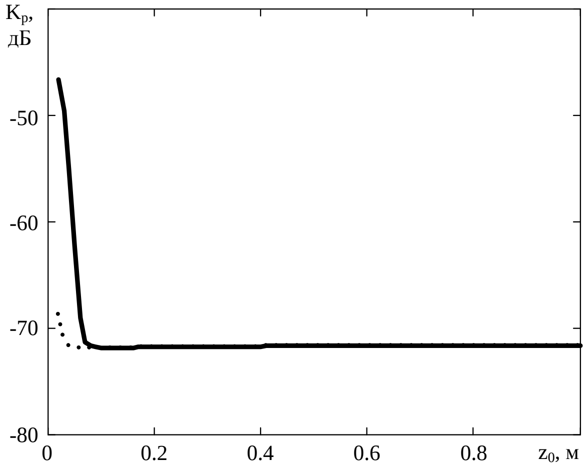

Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от заглубления излучателя

На графиках отображен коэффициент прохождения по давлению в зависимости от следующих параметров:

– заглубление источника 0.15 м, угол скольжения 50^0, диапазон излучаемых частот от 1 до 20 кГц, высота расположения микрофона 0.15 м (рис. 3);

– диапазон глубин расположения источника от 0.01 до 1 м, высота расположения микрофона 0.15 м, угол скольжения 50^0, частота излучения 10 кГц (рис. 4).

Сплошной линей показан коэффициент прохождения с учетом вклада плоских неоднородных волн. Пунктирной линией обозначен коэффициент прохождения без учета вклада плоских неоднородных волн. Из рисунков 3-4 видно, что при соблюдении определенных условий, неоднородная компонента оказывает весомое влияние в прохождение звука через границу раздела вода-воздух. Чем ниже частота излучателя и его заглубление относительно границы раздела, тем больше коэффициент прохождения.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента прохождения от параметров источника подробно изложены в работах [6-12].

Исследование зависимости коэффициента прохождения границы раздела вода-воздух в низкочастотном диапазоне может иметь важные следствия в целом ряде фундаментальных и прикладных проблем. Возрастание прозрачности границы раздела требует переоценки возможности акустической коммуникации из воды в воздух, обнаружения подводных источников, без погружения в воду и акустического мониторинга физических процессов, происходящих под водой.

Работа выполнена при поддержке при поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы») ГК №14.518.11.7068.

Литература:

1. Исакович М.А. Общая акустика [Текст] – М.: Наука, 1973. – 496 с.

2. Бреховских Л.М. Отражение и преломление сферических волн [Текст] // УФН. 1949. Т. 38. № 1. С. 1-41.

3. Бреховских Л.М., Годин. А.О. Акустика слоистых сред [Текст] – М.: Наука, 1989. – 416 с.

4. Godin O.A. Anomalous Transparency of Water-Air Interface for Low-Frequency Sound // Physical Review Letters, V. 97. – 2006. – № 16. – p 29.

5. Godin O.A. Sound transmission through water-air interfaces: new insights into an old problem // Contemporary Physics, V. 49. – 2008. - №. 2. - P. 105-123.

6. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Эффект аномальной прозрачности границы раздела жидкость-газ для звуковых волн [Текст] // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 2. С 186-192.

7. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Влияние неоднородных волн на прохождение низкочастотного звука через границу раздела вода-воздух [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. – №9 (134).– С. 201-206.

8. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Исследование влияния неоднородных волн на процесс прохождения звука через границу раздела вода-воздух [Текст] // Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2012, Т. 1. – С. 220-223.

9. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Роль неоднородных волн при прохождении звука из воды в воздух [Текст] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады 10-й международной научно-технической конференции. Книга 3. – Владимир: 2012. – С. 154-158.

10. Волощенко А.П., Тарасов С.П. Исследование частотной зависимости коэффициента прохождения акустических волн через границу раздела вода-воздух [Текст] // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012, С. 346-348.

11. Тарасов С.П., Тимошенко В.И., Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Солдатов Г.В., Волощенко А.П., Эсси-Эзинг А.С., Обыденная В.А., Франчук Д.А. Измерение фазочастотной характеристики приемной антенны многолучевого эхолота в условиях гидроакустического бассейна [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2012, №4. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1227 (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

12. Зибров В.А., Сапронов А.А., Соколовская О.В. Распространение акустической волны в замкнутой структуре водопровода на границе раздела сред [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2012, №4. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1430 (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.