

Раздел III. Акустические методы и приборы в медико-биологической практике

УДК 534.222

А.П. Волощенко, С.П. Тарасов

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛН НА ПРОХОЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ*

Представлены результаты математического моделирования и экспериментов по влиянию плоской неоднородной волны на процесс прохождения через границу раздела вода-воздух. Исследования коэффициента прохождения акустических волн из воды в воздух показывают, что его величина незначительна и не зависит ни от частоты излучения источника, ни от глубины его расположения относительно границы раздела, что объясняется малым значением отношения акустических импедансов сред. Но если излучатель находится на расстоянии меньше длины волны, помимо акустической волны, распространяющейся по законам геометрической акустики, необходимо учитывать влияние неоднородной плоской волны, так как, падая на границу, она возбуждает в воздушной среде обычные плоские волны, тем самым увеличивая звукопрозрачность данной границы.

Неоднородная волна; граница раздела; низкие частоты; монополь.

A.P. Voloshchenko, S.P. Tarasov

THE EFFECT OF EVANESCENT WAVES IN THE LOW-FREQUENCY SOUND TRANSMISSION THROUGH THE INTERFACE WATER-AIR

The paper presents the results of mathematical modeling and experiments on the effect of inhomogeneous plane waves on the process of passing through the interface water-air. Studies of the transmission coefficient of acoustic waves from water to air shows that its value is negligible and does not depend on the frequency of the radiation source or from the depth of its location relative to the interface, due to a small value of the ratio of acoustic impedances of the media. But if the radiator is at a distance smaller than the wavelength, in addition to the acoustic wave propagating under the laws of geometrical acoustics, it is necessary to take into account the influence of an inhomogeneous plane wave, since the incident on the border, it arouses in the air the usual plane waves, thus increasing the sound transmission of the interface.

Inhomogeneous wave; the interface; the low frequency; monopole.

Зачастую передача звука через границу раздела вода-воздух рассматривается в акустических учебниках как наглядный пример применения закона Снеллиуса и коэффициентов отражения и прохождения Френеля. Также данный процесс часто обсуждается в популярной литературе в связи с вопросом «Можем ли мы слышать разговоры рыб?». Практический интерес к изучению волновых процессов на границе раздела вода-воздух был связан с шумами, создаваемыми вертолетами, винтовыми самолетами, сверхзвуковым транспортом и т.д. Исследовались спосо-

* Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» ГК №14.518.11.7068.

бы акустического обнаружения и измерения дальности до самолета с подводной платформы, а также возможное негативное влияние данных шумов на морскую флору и фауну [1]. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования прохождения звука через данную границу раздела сосредотачивались на изучении акустического поля в воде, которое образуется в воздухе с помощью воздушных источников. Изучению обратных процессов, т.е. формированию акустического поля в воздухе благодаря мощным подводным источникам, уделялось гораздо меньше внимания. Это связано с тем, что согласно устоявшемуся мнению, коэффициент прохождения звука через границу раздела вода-воздух незначителен и не зависит ни от частоты излучения источника, ни от глубины его расположения относительно границы раздела, ни от геометрических параметров самого излучателя, а определяется только соотношением акустических импедансов соприкасающихся сред. Для упрощения описания процессов происходящих на границах раздела, вместо волновой теории, применяют лучевую теорию. Отражение и прохождение плоских волн в случае точечного источника звука подробно рассмотрено в работе [2].

Однако в статье Л.М. Бреховских [3] теоретически доказано, что использование лучевой теории для сферических и цилиндрических волн имеет ряд ограничений, связанных с местом расположения источника (приемника) относительно границы раздела. В частности при прохождении акустической волны из акустически жесткой среды в акустически мягкую среду (коэффициент преломления больше единицы), излучатель должен находиться на расстоянии большем длины волны от границы раздела. Если данное условие не выполняется, помимо акустической волны, распространяющейся по законам геометрической акустики, также необходимо учитывать появляющуюся дифракционную компоненту. Обычно ею можно пренебречь, так как амплитуда возникающей неоднородной волны быстро затухает. Но на малых дистанциях неоднородная волна может оказывать существенное влияние на процесс прохождения образовавшейся преломленной волны. Процесс прохождения акустической волны через границу раздела вода-воздух с учетом влияния неоднородной волны показан на рис. 1. Путь OTS соответствует обычному лучу, построенному по законам геометрической оптики; путь OMS чужд геометрической оптике. Системой OM горизонтальных черточек отображается неоднородная волна.

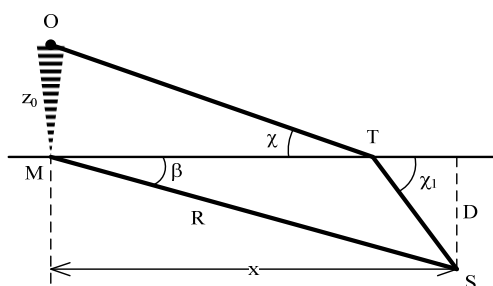


Рис. 1. Два пути, которыми излученная волна проходит от излучателя O в приемник S

Относительно недавно, вопрос влияния неоднородных волн на прохождение низкочастотных акустических волн через границу раздела вода-воздух получил дальнейшее развитие в ряде статей О.А. Година [4, 5]. В них автор, с помощью математических расчетов, оценивает вклад неоднородных волн в перенос энергии через границу раздела жидкость-газ. Согласно его выводам, неоднородная компонента зависит как свойств граничащих сред (показатель преломления и отношения плотностей), так и от параметров источника (его расположения и типа).

Согласно строгому волновому расчету, поток энергии в воздух может на несколько порядков превосходить величину, предсказываемую лучевой теорией. Более того, при определенных условиях граница раздела становится аномально прозрачной для звука, т. е. практически вся генерируемая подводным источником акустическая мощность излучается в воздух. В согласии с установленным Л.М. Бреховских правилом [3], дифракционные эффекты существенны, и явление аномальной прозрачности оказывается возможным только на достаточно низких частотах, когда глубина источника меньше или порядка длины звуковой волны [5].

Рассмотрим математическую модель, разработанную А.О. Годининым, в работах [4, 5].

$$K_I = 10 \log \left(\frac{m J_0 [A_1(n, m) + A_2(n, m, k_1 z_0)]}{J_0 [T_1(n, m, k_1 z_0) + T_2(n, m, k_1 z_0)]} \right),$$

где A_1 и T_1 – описывают вклады однородных плоских волн в воде, в то время как A_2 и T_2 описывают вклады тех неоднородных плоских волн в воде, которые порождают однородные преломленные волны в воздухе. J_0 – это мощность, излучаемая монопольным источником в воде в отсутствие границы.

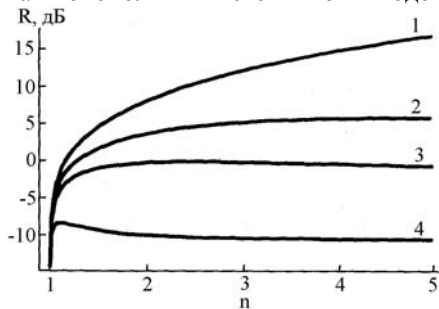


Рис. 2. Роль неоднородных волн в излучении звука точечным источником через границу раздела в среде с меньшей скоростью звука [5]

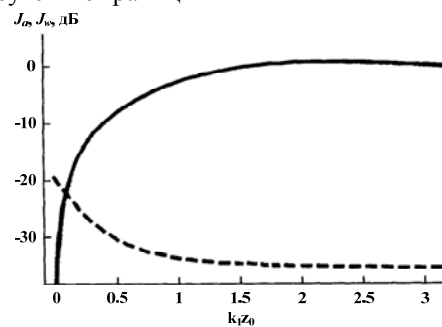


Рис. 3. Акустическое излучение в воздух и воду от точечного источника, расположенного под водой [5]

Влияние неоднородных волн в прохождении звука через границу раздела двух сред показано на рис. 2. Отношение R вкладов неоднородных и однородных волн в потолок акустической энергии через границу показано в логарифмическом масштабе как функция показателя преломления для монопольного источника и различных безразмерных глубин источника: $k_1 z_0 = 0$ (1), $\pi/8$ (2), $\pi/4$ (3) и $3\pi/4$ (4). Из графиков видно, что чем ближе к границе раздела расположен источник и, чем ниже его частота, тем заметнее вклад неоднородных волн в перенос энергии через данную границу, по отношению к однородным волнам. Необходимо отметить, что возрастание коэффициента преломления ($n > 1$), также способствует увеличению степени влияния неоднородных волн на процесс. Кривые на рис. 3 подтверждают сделанные выше выводы – понижение частоты излучения и уменьшение глубины расположения источника относительно границы сред, увеличивает поток энергии, проходящий через границу раздела вода-воздух. Потоки мощности в воздух J_a (пунктирная линия) и уходящие на бесконечность в воде J_w (сплошная линия) показаны как функция безразмерной глубины источника для акустического монополя. Потоки J_a и J_w нормированы на полный поток мощности, излучаемый соответствующим источником в безграничной среде. Показатель преломления $n = 4,5$, отношение плотностей сред $m = 0,0013$.

К похожим результатам можно прийти, если исследовать коэффициент прохождения по давлению через границу раздела вода-воздух. Обратимся к математическим расчетам для монополя, сделанным Л.М. Бреховских, в работе [3]. Приведем конечную формулу, описывающую коэффициент прохождения по давлению через границу раздела вода-воздух (1).

Построим графики зависимостей коэффициента прохождения по давлению границы раздела вода-воздух от частоты источника, его глубины, угла скольжения и высоты расположения приемника в воздухе (рис. 4, 5).

На графиках представлены зависимости коэффициента прохождения по давлению для следующих параметров:

- ♦ угол скольжения 50°, глубина расположения источника 0,15 м, высота расположения микрофона 0,15 м, диапазон излучаемых частот от 1 до 30 кГц (рис. 4);
- ♦ угол скольжения 50°, частота излучения источника 10 кГц, высота расположения микрофона 0,15 м, диапазон глубин расположения источника от 0,01 до 1 м (рис. 5).

$$K_p = \frac{\rho_2 2\sqrt{\cos(\chi)} e^{ik_1 \left(\frac{z_0}{\sin(\chi)} + \frac{n^2 D}{\sqrt{n^2 - \cos^2(\chi)}} \right)}}{\sqrt{x \left(\frac{z_0}{\sin^3(\chi)} - \frac{n^2 D}{(\sqrt{n^2 - \cos^2(\chi)})^3} \right) (m \sin(\chi) + \sqrt{n^2 - \cos^2(\chi)})} + \frac{\rho_1 e^{ik_1 r}}{\rho_2 \frac{2n}{R} e^{ik_2 R - k_1 z_0 \sqrt{n^2 \cos^2(\beta) - 1}} \left(\frac{\sin(\beta)}{n \sin(\beta) + im \sqrt{n^2 \cos^2(\beta) - 1}} + \frac{i}{m(1-n^2)k_1 R} \right)} + \frac{i \rho_1 e^{ik_1 r}}{i \rho_1 e^{ik_1 r}}}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотность водной и воздушной сред соответственно; ω – круговая частота; χ – угол скольжения; k_1 и k_2 – волновое число в водной и воздушной среде соответственно; D – высота расположения приемника в воздушной среде; R – путь, который проходит неоднородная волна от границы раздела до приемника; r – расстояние от излучателя до приемника в водной среде (рис. 1).

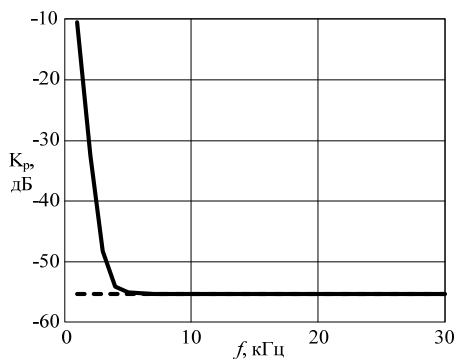


Рис. 4. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от частоты излучателя

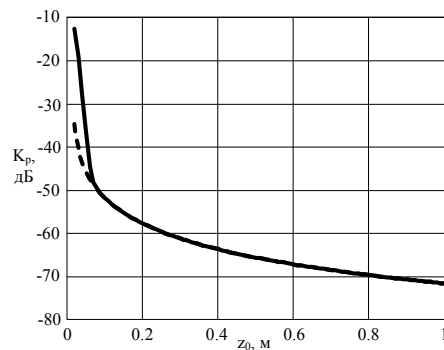


Рис. 5. Зависимость коэффициента прохождения по давлению от глубины расположения излучателя

Сплошная линия – коэффициент прохождения с учетом влияния неоднородных волн. Пунктирная линия – коэффициент прохождения без учета влияния неоднородных волн. Как видно из рис. 4, 5, при 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.

Теоретический анализ и расчеты показали, что влияние неоднородных волн проявляется в существенном увеличении прозрачности границы раздела вода-воздух. Для проверки существования эффекта аномальной прозрачности и оценки достоверности математических расчетов А.О. Година и Л.М. Бреховских была проведена серия экспериментов по измерению коэффициентов прохождения через границу раздела вода-воздух, результаты и условия проведения подробно рассмотрены в [7, 8].

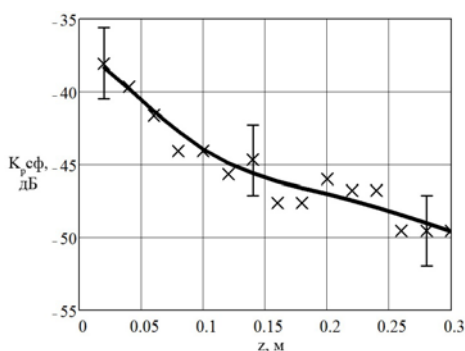


Рис. 6. Зависимости коэффициента прохождения по давлению при излучении сферическим источником

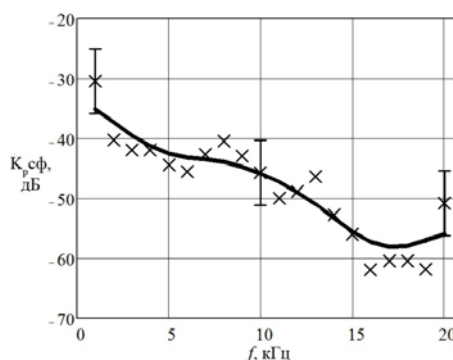


Рис. 7. Зависимости коэффициента прохождения по давлению при излучении сферическим источником

На графиках представлены зависимости коэффициента прохождения по давлению:

- ♦ для сферического излучателя, в диапазоне глубин 2–30 см для частоты излучения источника 10 кГц (рис. 6);
- ♦ сферического излучателя, в диапазоне частот 1–20 кГц для глубины расположения источника 15 см (рис. 7).

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

Сравнение и анализ графиков (рис. 3–7) показывает, что полученные теоретические и экспериментальные зависимости существенно расходятся с лучевой теорией [2], 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 зависимостей (рис. 3–7) имеют схожий характер, а отличаются только крутизной нарастания и количественными значениями. Экспериментальные результаты качественно совпадают с теоретическими расчетами [3–5]. Влияние неоднородных волн приводит к увеличению прозрачности границы раздела вода-воздух на низких частотах при расположении точечного источника на расстояниях меньших длины волны от границы. Полученные результаты показали, что данный вопрос требует более подробного экспериментального изучения.

В отличие от высокочастотных полей, низкочастотные акустические поля в воде и в воздухе гораздо сильнее связаны, чем считалось ранее. Аномальная прозрачность границы воды и воздуха в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот может иметь важные следствия в целом ряде геофизических, биологических, экологических и прикладных проблем, таких как генерация низкочастотного шумового поля в атмосфере воздушными пузырьками, схлопывающимися под поверхностью океана, нагрев верхней атмосферы инфразвуком, генерируемым под водой, понимание роли слуха у хищных птиц в их охоте на морских животных и выяснение возможности мониторинга и оценки энергии мощных подводных взрывов путем инфразвуковых измерений в атмосфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Urick R.J.* Noise signature of an aircraft in level flight over a hydrophone in the sea // *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 52. – 1972. – № 3. – P. 993-999.
2. *Исакович М.А.* Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
3. *Бреховских Л.М.* Отражение и преломление сферических волн // *УФН.* – 1949. – Т. 38, № 1. – С. 1-41.
4. *Бреховских Л.М., Годин А.О.* Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
5. *Годин О.А.* Прохождение низкочастотного звука из воды в воздух // *Акустический журнал.* – 2007. – Т. 53, № 3. – С. 353-361.
6. *Godin O.A.* Sound transmission through water-air interfaces: new insights into an old problem // *Contemporary Physics.* – 2008. – Vol. 49, № 2. – P. 105-123.
7. *Тарасов С.П., Волощенко А.П.* Исследования прозрачности границы раздела вода-воздух // Доклады XIII школы-семинара им. акад. Л. Б. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского Акустического общества. – М.: ГЕОС, 2011. – С. 155-158.
8. *Волощенко А.П., Тарасов С.П.* Экспериментальные исследования эффекта аномальной прозрачности границы раздела вода-воздух для низких частот // Сборник трудов научной конференции «Сессия научного совета РАН по акустике и XXIV Российского акустического общества». – М.: ГЕОС, 2011. – Т. 1. – С. 202-204.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор З.М. Юлдашев.

Волощенко Александр Петрович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: vigcorp@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371795; аспирант.

Тарасов Сергей Павлович – e-mail: tarasov@fep.tti.sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Voloshchenko Alexander Petrovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: vigcorp@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; postgraduate student.

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