Пространственно-временной спектр среднего вертикального потока мощности представляется выражением $S_{pw}(\omega, \varkappa, z) = 0{,}5(\rho_0\omega)^{-1}S_{p\text{д}}(\omega, \varkappa)[d^{1/2}bf(d^{1/2}, H-h)]$ во всей области $z \leqslant H$. Для спектра характерны независимость от глубины, что связано с переносом энергии лишь распространяющимися волнами. Временной спектр $S_{pw}(\omega, z)$ и средний поток мощности J также характеризуются постоянными уровнями по всей глубине. Например, в случае некоррелированных по пространству источников – это функции $\sim(2\pi b\omega^2/3\rho_0c^3)S_{p\text{д}}(\omega)$ и $(2\pi)^{3/2}b\Omega^3/3\rho_0c^3$ соответственно. При $b \to 0$ в отсутствие затухания имеем изотропное поле в слое, для которого $J=0$.

Проведенный анализ позволяет выявить общие закономерности распространения звуковых волн от шумовых источников в стратифицированной среде и определить характерные параметры задачи. Это может служить основой для проведения численного моделирования.

В заключение автор выражает благодарность В. И. Кляцкину за постоянное внимание и полезные обсуждения при выполнении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Газарян Ю. Л.* Об энергетическом спектре шума в плоскослоистых волноводах.– Акуст. журн., 1975, т. 21, № 3, с. 382–390.
2. *Кляцкин В. И., Любавин Л. Я.* О краевых задачах теории распространения внутренних волн в слоистом океане.– Докл. АН СССР, 1983, т. 271, № 6, с. 1496–1498.
3. *Кляцкин В. И., Любавин Л. Я.* К теории возбуждения и распространения акустико-гравитационных волн в слоистом океане.– Изв. АН СССР, ФАО, 1984, т. 20, № 5, с. 422–430.
4. *Исакович М. А., Курьянов Б. Ф.* К теории низкочастотных шумов океана.– Акуст. журн., 1970, т. 16, № 1, с. 62–74.
5. *Курьянов Б. Ф.* Пространственная корреляция полей, излученных случайными источниками на плоскости.– Акуст. журн., 1963, т. 9, № 4, с. 441–448.

Тихоокеанский океанологический институт
Дальневосточного научного центра
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
2.VIII.1984

УДК 534.26

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ПРОДОЛЬНЫЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД И ПРОБЛЕМА ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

Данилов С. Д., Миронов М. А.

Генерация звука турбулентностью над плоской, жесткой границей может рассматриваться как процесс преобразования поперечных (вязких) волн, порождаемых пульсациями рейнольдсовых напряжений, в продольные (звуковые) при падении поперечных волн на границу [1–3]. В связи с этой проблемой представляет интерес рассмотреть преобразование поперечных волн в продольные на границе раздела двух сред и выяснить возможности уменьшения амплитуды продольных волн. Для единообразия обозначений будем считать обе среды твердыми (переход от твердой среды к жидкой осуществляется заменой в итоговых формулах модуля сдвига μ твердой среды на величину $i\omega\rho\nu$, где ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность среды, ω – частота). Как будет показано ниже, существенное снижение амплитуды продольных волн возможно только для водоподобных сред, т. е. таких, у которых модуль сдвига μ значительно меньше модуля всестороннего сжатия K, а скорость продольных волн $c_l = \sqrt{(K+4\mu/3)/\rho}$ значительно больше скорости поперечных волн $c_t = \sqrt{\mu/\rho}$. В связи с этим будем предполагать при проведении вычислений, что обе среды водоподобны (например, одна из сред – вода, другая – каучук). Поскольку преобразование поперечной волны в продольную возможно только в том случае, если в падающей поперечной волне вектор смещения лежит в плоскости падения [4], ниже рассмотрен только этот случай.

Направим координатную ось OX вдоль границы раздела, ось OZ – перпендикулярно. Из полупространства $z>0$ на границу падает поперечная волна с векторным потенциалом $\psi_0 = \exp(-i\omega t + i\xi x - i\eta_t z)$, $\eta_t^2 = k_t^2 - \xi^2$, $k_t = \omega/c_t$. От границы отходят: в полупространство $z>0$ – отраженная поперечная волна $\psi = V_t \exp(-i\omega t + i\xi x + i\eta_t z)$ и отраженная продольная волна со скалярным потенциалом $\varphi = V_l \exp(-i\omega t + i\xi x + i\eta_l z)$, $\eta_l^2 = k_l^2 - \xi^2$, $k_l = \omega/c_l$, в полупространство $z<0$ – прошедшая поперечная волна с векторным потенциалом $\psi' = W_t \exp(-i\omega t + i\xi x - i\eta_t' z)$, $\eta_t'^2 = k_t'^2 - \xi^2$, $k_t' = \omega/c_t'$ и прошедшая продольная волна со скалярным потенциалом $\varphi' = W_l \exp(-i\omega t + i\xi x - i\eta_l' z)$, $\eta_l'^2 = k_l'^2 - \xi^2$, $k_l' = \omega/c_l'$. На границе раздела выполняются условия неразрывности нормальных и касательных напряжений и смещений. Используя известные выражения для смещений и напряжений (см., например, [4, с. 455–456]), получим следующую систему уравнений для определения коэффициентов отражения V_t, V_l и прохождения W_t, W_l:

$$\xi V_l-\eta_t V_t-\xi W_l-\eta_t' W_t=-\eta_t, \quad \eta_l V_l+\xi V_t+\eta_l' W_l-\xi W_t=-\xi,$$

$$-2\xi\eta_l V_l+(-k_t^2+2\eta_t^2)V_t-(\mu'/\mu)2\xi\eta_l' W_l-(\mu'/\mu)(-k_t'^2+2\eta_t'^2)W_t=-(-k_t^2+2\eta_t^2),$$

$$(-k_t^2+2\xi^2)V_l+2\xi\eta_t V_t-(\mu'/\mu)(-k_t'^2+2\xi^2)W_l-(\mu'/\mu)2\xi\eta_t'^2 W_t=-2\xi\eta_t. \tag{1}$$

Решение этой системы в случае водоподобных сред упрощается: в уравнениях, соответствующих равенствам касательных смещений и напряжений (первое и третье уравнения системы (1)), можно пренебречь слагаемыми, связанными с продольными волнами. В результате получаем систему из двух уравнений для V_t и W_t, решение которой имеет вид

$$V_t=\frac{1-\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'}}{1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'}}, \quad W_t=\frac{2\rho/\rho'}{1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'}}. \tag{2}$$

Подставляя (2) во второе и четвертое уравнения системы (1), получаем систему из двух уравнений для определения коэффициентов отражения и прохождения продольных волн V_l и W_l, решая которую, находим

$$V_l=2\frac{\xi}{\eta_l}\frac{(1-\rho'/\rho)-2(\eta_l'/k_t)(-1+\sqrt{\rho\mu'/\rho'\mu})}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})},$$

$$W_l=2\frac{\xi}{\eta_l}\frac{(-1+\rho/\rho')+2(\eta_l/k_t')(-1+\sqrt{\rho\mu'/\rho'\mu})}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})}. \tag{3}$$

Коэффициент отражения продольной волны от абсолютно жесткой границы $V_{l\infty}$ получаем из (3), полагая $\rho'=\infty$:

$$V_{l\infty}=-2\xi/\eta_l. \tag{4}$$

Согласно (3), (4), относительные коэффициенты отражения и прохождения $V_l/V_{l\infty}$, $W_l/V_{l\infty}$ равны

$$\frac{V_l}{V_{l\infty}}=-\frac{1-\rho'/\rho-2(\eta_l'/k_t)(-1+\sqrt{\rho\mu'/\rho'\mu})}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})},$$

$$\frac{W_l}{V_{l\infty}}=-\frac{-1+(\rho/\rho')+2(\eta_l/k_t')(-1+\sqrt{\rho\mu'/\rho'\mu})}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})}. \tag{5}$$

Из (5) следует, что эффективность преобразования поперечной волны в продольную мала, если плотности сред мало отличаются друг от друга, а скорости поперечных волн в обеих средах много меньше скорости продольных волн (точнее, если $\eta_l'/k_t\ll1$, $\eta_l/k_t'\ll1$). Формулы (5) упрощаются, если скорость поперечных волн во второй среде много больше скорости поперечных волн в первой среде – $\sqrt{\rho\mu'/\rho'\mu}\ll1$ (именно такая ситуация реализуется на границе раздела вода – каучук):

$$\frac{V_l}{V_{l\infty}}\simeq-\frac{1-\rho'/\rho+2\eta_l'/k_t'}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})}; \quad \frac{W_l}{V_{l\infty}}\simeq-\frac{-1+\rho/\rho'-2\eta_l/k_t'}{(\rho'/\rho+\eta_l'/\eta_l)(1+\sqrt{\rho\mu/\rho'\mu'})}. \tag{6}$$

Например, коэффициент отражения продольной волны на границе раздела вода – каучук ($c_l, c_l'\sim1500$ м/с, $c_t'\sim20$ м/с, $\rho'/\rho\sim0{,}9$) в 10 раз меньше коэффициента отражения на границе вода – абсолютно жесткое тело. Во столько же раз снижается амплитуда звукового давления, порождаемого турбулентностью вблизи границы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Наугольных К. А., Рыбак С. А.* Об излучении звука турбулентным пограничным слоем.– Тр. АКИН. М., 1971, т. 16, с. 129–134.
2. *Наугольных К. А., Рыбак С. А.* Об излучении звука турбулентным пограничным слоем.– Акуст. журн., 1980, т. 26, № 6, с. 890–894.
3. *Landahl M. T.* Wave mechanics of boundary layer turbulence and noise.– JASA, 1975, v. 57, № 4, p. 824–831.
4. *Исакович М. А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
9.IV.1984