УДК 534.26
© 1991 г.

А.Д. Лапин

ЗАТУХАНИЕ НУЛЕВОЙ МОДЫ В ВОЛНОВОДЕ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ ВСЛЕДСТВИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ НА СТЕНКАХ

Задача о распространении звука в волноводе, облицованном звукопоглощающим материалом, неоднократно рассматривалась в литературе методом разделения переменных [1–3]. Однако этим методом можно найти нормальные моды только в волноводе с сечением простейшей формы (прямоугольным, круговым). Для волновода с сечением произвольной формы эта задача до сих пор не решена. Ниже на основе уравнения для усредненного (по сечению волновода) звукового поля рассчитано волновое число нулевой моды в волноводе с поглощающими стенками при любой форме его сечения.

Пусть стенки волновода характеризуются нормальной проводимостью Y и пусть в цилиндрической системе координат (r, φ, z) они описываются уравнением $r = R(\varphi)$. Волновод заполнен однородной средой, плотность этой среды и скорость звука в ней равны соответственно ρ и c. Звуковое давление p в среде удовлетворяет уравнению

$$\Delta p + k^2 p = 0, \tag{1}$$

где $k = \omega/c$, ω – частота звука. На стенках волновода выполняется граничное условие

$$\partial p/\partial \mathbf{n} = ik\rho c Y p, \tag{2}$$

где $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к поверхности $r = R(\varphi)$. Требуется найти волновое число нулевой моды в волноводе с поглощающими стенками ($\mathrm{Re}\ Y > 0$). Нулевая мода в волноводе с жесткими стенками ($Y = 0$) представляет собой "обычную" плоскую волну, бегущую вдоль его оси.

Обозначим через $\tilde{p}(z)$ усредненное (по сечению S волновода) звуковое давление и через p' – отклонение звукового давления от его усредненного значения:

$$\tilde{p} = \frac{1}{S}\int_S p\,dS, \quad p = \tilde{p} + p'.$$

Получим уравнение для величины $\tilde{p}(z)$. С этой целью проинтегрируем уравнение (1) по сечению S волновода:

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k^2\right)\int_S p\,dS + \int_S \left(\Delta - \frac{d^2}{dz^2}\right) p\,dS = 0.$$

При учете теоремы Грина

$$\int_S \Delta_\perp p\,dS = \int_l \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}}\,dl,$$

где $\Delta_\perp \equiv (\Delta - d^2/dz^2)$ – двумерный лапласиан по координатам r, φ, l – контур сечения S и граничного условия (2) на стенках волновода, получим следующее уравнение для величины $\tilde{p}(z)$:

$$\frac{d^2\tilde{p}}{dz^2} + k^2\tilde{p} + ik\rho c Y/S \int_l (\tilde{p} + p')\,dl = 0. \tag{3}$$

Звуковое поле в волноводе можно представить в виде суперпозиции нормальных мод. Поскольку моды в волноводе не взаимодействуют друг с другом, то уравнение (3) выполняется в отдельности для каждой из них. Для нулевой моды величина $|p'|$ равна нулю при $Y = 0$ и мала по сравнению с величиной $|\tilde{p}|$ при $\rho c|Y| \ll 1$. Следовательно, при малой нормальной проводимости стенок волновода нулевая мода удовлетворяет приближенному уравнению

$$\frac{d^2\tilde{p}_0}{dz^2} + (k^2 + ik\rho c Y l/S)\tilde{p}_0 = 0.$$

Согласно этому уравнению, волновое число нулевой моды равно

$$\xi_0 = \sqrt{k^2 + ik\rho c Y l/S}, \tag{4}$$

где l и S – соответственно периметр и площадь сечения волновода. Затухание нулевой моды определяется экспоненциальным множителем $\exp(-\mathrm{Im}\,\xi_0 z)$. При $\rho c|Y|l/(kS) \ll 1$ имеем приближенно $\mathrm{Im}\,\xi_0 = \rho c l\,\mathrm{Re}\,Y/(2S)$. Для волноводов с прямоугольным и круговым сечениями формула (4) переходит в известные формулы, полученные ранее методом разделения переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Морз Ф.* Колебания и звук. М.–Л.: ГИТТЛ, 1949.
2. *Morse P.M.* The transmission of sound inside pipes // J. Acoust. Soc. Amer. 1939. V. 11. № 2. P. 205–210.
3. *Molloy C.T., Honigman E.* Attenuation of sound in lined circular ducts // J. Acoust. Soc. Amer. 1945. V. 16. № 4. P. 267–272.

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

Поступила в редакцию
18.04.90

УДК 534.44

© 1991 г.

А.Ю. Любченко, В.Г. Петников

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ МЕЛКОГО МОРЯ

При изучении динамических шумовых полей океана часто можно встретиться с неравномерным распределением интенсивности шума по глубине, что может быть вызвано различными причинами [1–3]. Одной из таких причин может являться неравномерное распределение значений скорости звука $C(z)$ в толще океана. Как правило, наблюдается зависимость между изменениями уровня шумового поля и распределением скорости звука от глубины. Экспериментальные данные по вертикальному распределению уровня шума, полученные в глубоком океане, свидетельствуют о существовании иногда незначительного увеличения уровня шумового поля на оси подводного звукового канала в области низких частот – порядка нескольких десятков Герц [3].

В данной работе приводятся экспериментальные результаты по измерению вертикальной структуры интенсивности поля динамических шумов в мелком море для различных зависимостей скорости звука от глубины.

Для записи шумов моря использовалась вертикальная линейная антенна длиной 40 метров, состоящая из 12 приемных гидрофонов, расположенных эквидистантно на расстоянии 3,5 м друг от друга. Антенна подвешивалась вертикально к бую, дрейфовавшему на расстоянии 50–60 м от борта корабля. Глубина погружения верхнего гидрофона изменялась для разных постановок в пределах 40–60 м от уровня моря. Сигналы с отдельных гидрофонов антенны поступали по кабелю связи, который поддерживался на специальных поплавках, демпфирующих рывки кабеля, связанные с дрейфом корабля.

Измерение шумов моря производилось вдали от судоходных трасс и береговой линии с дрейфующего корабля, находящегося в режиме тишины, (были выключены все основные механизмы, включая главный двигатель и дизель-генератор). Питание научного оборудования производилось с помощью специального шумозаглушенного генератора. В гидрофонах антенны использовалась особая конструкция предусилителей с двумя фильтрами высоких частот с частотами среза 100 и 10 Гц и крутизной 12 и 6 дБ соответственно. Фильтр с частотой среза 10 Гц был установлен непосредственно на входе предусилителя и был выполнен на пассивных элементах, что обеспечивало большой динамический диапазон его действия. Предусилители обеспечивали эффективное подавление помеховых сигналов инфранизких частот, появление которых в спектре принимаемого сигнала связано с рывками антенны, возникающих при воздействии поверхностного волнения на несущий буй.

Шумовое поле записывалось на 12 каналов аналогового магнитофона с 12 гидрофонов вертикальной антенны в диапазоне частот $\Delta f = 100–600$ Гц. Время усреднения при получении средних спектральных уровней шума равнялось 20 мин, количество усредняемых спектров – 60.

С помощью ЭВМ рассчитывались средние спектральные уровни шума для каждого из 12 приемных гидрофонов антенны и оценивалась ошибка измерения уровня шума с вероятностью 0,95. Также были получены средние значения спектральных уровней шума антенны в диапазоне частот $\Delta f = 200–600$ Гц. Расчеты производились для различных профилей скорости звука $C(z)$, соответствующих различным точкам измерения и различным метеоусловиям.

Измерения спектрального уровня шума показали, что в режиме тишины судна уровень принимаемых акустических шумов понижался на 15–20 дБ по отношению со штатным режимом работы механизмов судна и был сравним в исследуемом диапазоне частот с уровнем динамических шумов моря.

Измерения шума, проведенные с помощью антенны аналогичной конструкции, соединенной с автономной донной станцией, имеющей многоканальную систему записи информации и установленной на расстоянии 15 миль от одной из точек измерений, позволили получить аналогичное зна-