АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXIII 1987 Вып. 3

УДК 534.26

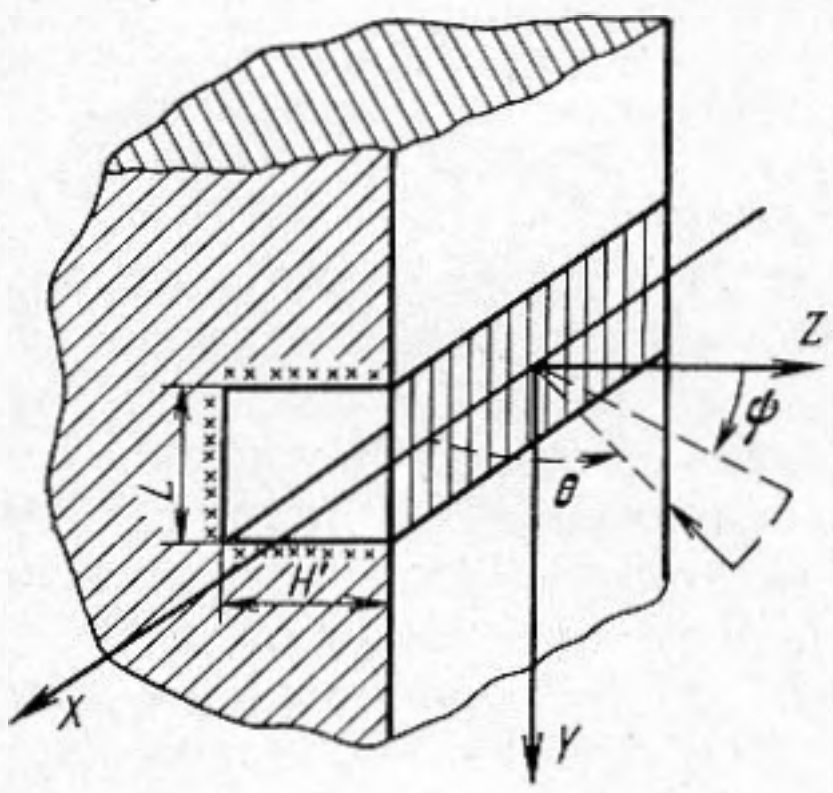
ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В УГЛУБЛЕНИИ ЖЕСТКОГО ЭКРАНА

Галаненко В. Б., Лозовик В. Г., Мацыпура В. Т.

Решена задача дифракции плоской волны на углублении (нише) с импедансными поверхностями, расположенном в жестком экране и прикрытом ортотропной пластиной. Исследовано влияние параметров ниши и пластины на направленные свойства антенны, расположенной в нише.

В некоторых случаях акустические антенны размещают, исходя из конструктивных соображений, в углублении экрана, прикрытом оболочкой (в нише). При этом направленные свойства антенны изменяются по сравнению со случаем свободного пространства. Изменения вызваны совместным действием нескольких факторов: затенением части антенны гранями ниши при скользящем падении звука, волноводным характером распространения звука в самой нише [1], влиянием оболочки.

В настоящей работе вопрос о влиянии специфики размещения антенны в нише на ее направленность исследуется на модели, содержащей бесконечный жесткий экран, нишу, бесконечно протяженную вдоль оси X, и ортотропную пластину умеренной толщины с шарнирным закреплением на ребрах ниши (фиг. 1). Внутренние поверхности ниши — импедансные, так что при $y=\pm L/2: \Phi+з_1\partial\Phi/\partial n=0$; и при $z=-H: \Phi+з_2\partial\Phi/\partial n=0$. Эта модель в отличие от использованной в работе [1] позволяет учесть влияние поглощения звука в нише и влияние пластины.



Фиг. 1. Исследуемая модель

Закономерности прохождения звука через изотропную пластину конечной ширины, закрепленную в отверстии жесткого экрана, известны из работы [2], где доказана необходимость учета не только изгибных, но также и продольных колебаний. Поскольку движение пластины зависит как от ее собственных параметров, так и от характера нагружения средой, то представляет интерес исследование звукопрозрачности пластины, нагруженной на замкнутый объем, каким является ниша. Рассматривая ортотропную пластину, предстоит в соответствии с [2] учесть как изгибные, так и продольные колебания.

Соответствующие уравнения движения пластины, связывающие касательные смещения точек срединной плоскости $u(x, y)$, $v(x, y)$, нормальные перемещения внешних поверхностей $\overset{1}{W}(x, y)$, $\overset{2}{W}(x, y)$ и наклоны нормалей к оси $Z: \zeta(x, y)$ и $\xi(x, y)$, были получены нами с помощью метода прямых нормалей по схеме, применяемой в работе [3] при исследовании плоских деформаций изотропной пластины. Для функций u, v и $W_c=(\overset{2}{W}-\overset{1}{W})/2$, характеризующих симметричные (продольные) колебания, они имеют такой вид:

$$A_{11}h\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-A_{66}h\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\omega^2\rho hu+(A_{12}+A_{66})h\frac{\partial^2 v}{\partial x\,\partial y}-A_{13}\frac{\partial W_c}{\partial x}=$$

$$= -\frac{1}{2}(\overset{2}{\tau}_{xz} - \overset{1}{\tau}_{xz}),$$

$$A_{22}h\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_{66}h\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \omega^2\rho h v + (A_{12}+A_{66})h\frac{\partial^2 u}{\partial x\,\partial y} -$$

$$-A_{23}\frac{\partial W_c}{\partial y} = -\frac{1}{2}(\overset{2}{\tau}_{yz} - \overset{1}{\tau}_{yz}),$$

$$A_{44}\frac{h}{3}\frac{\partial^2 W_c}{\partial x^2} + A_{55}\frac{h}{3}\frac{\partial^2 W_c}{\partial y^2} + \left(\frac{\omega^2\rho h}{3} - \frac{A_{33}}{h}\right)W_c + \tag{1}$$

$$+A_{13}\frac{\partial u}{\partial x} + A_{23}\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{2}(\overset{2}{\sigma}_z + \overset{1}{\sigma}_z).$$

Для функций ζ, ξ и $W_a = (\overset{2}{W} + \overset{1}{W})/2$, характеризующих антисимметричные (изгибные) колебания:

$$A_{11}\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} + A_{66}\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\zeta}{\partial y^2} + \left(\frac{\omega^2\rho h^2}{3} - A_{44}\right)\zeta + (A_{12}+A_{66})\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\xi}{\partial x\,\partial y} +$$

$$+A_{44}\frac{\partial W_a}{\partial x} = \frac{1}{2}(\overset{2}{\tau}_{xz} + \overset{1}{\tau}_{xz}),$$

$$A_{22}\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\xi}{\partial y^2} + A_{66}\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} + \left(\frac{\omega^2\rho h^2}{3} - A_{55}\right)\xi + (A_{12}+A_{66})\frac{h^2}{3}\frac{\partial^2\xi}{\partial x\,\partial y} + \tag{2}$$

$$+A_{55}\frac{\partial W_a}{\partial y} = \frac{1}{2}(\overset{2}{\tau}_{yz} + \overset{1}{\tau}_{yz}),$$

$$A_{44}h\frac{\partial^2 W_a}{\partial x^2} + A_{55}h\frac{\partial^2 W_a}{\partial y^2} + \omega^2\rho h W_a - A_{44}h\frac{\partial\zeta}{\partial x} - A_{55}h\frac{\partial\xi}{\partial y} = -\frac{1}{2}(\sigma_z - \overset{1}{\sigma}_z).$$

Здесь ρ и h — плотность и полутолщина пластины, ω — угловая частота, σ и τ — нормальные и касательные напряжения на поверхности пластины, A_{ik} — упругие константы, связанные с модулями Юнга E_1, E_2, E_3, коэффициентами Пуассона ν_{ik} и модулями сдвига G_{ik} (i, k=1, 2, 3) следующим образом: $A_{44}=G_{13}$, $A_{55}=G_{23}$, $A_{66}=G_{12}$; при i, k=1, 2, 3 матрица A_{ik} обратна матрице $\|-\nu_{ik}/E_k\|$ (при $\nu_{11}=\nu_{22}=\nu_{33}=-1$). Граничные условия: $W_a=0$, $\partial\zeta/\partial y=0$, $\xi=0$, $\partial W_c/\partial y=0$, $\partial u/\partial y=0$, $v=0$ при $y=\pm\frac{L}{2}$ фиксирует равенство нулю момента и смещений в плоскости, нормальной к ребру, напряжений и поворотов вдоль ребра.

Для исследования направленности антенны необходимо провести расчет звукового поля в нише при падении на нее плоской волны из направления (θ, ψ). Представляя поле внутри ниши в виде ряда нормальных волн с неизвестными коэффициентами A_m и согласуя движение поверхностей пластины с движением среды в нише и вне ее, приходим после необходимых преобразований к парной системе бесконечных уравнений относительно A_m:

$$\sum_{m=1}^{\infty}[M^c_{nm}A_m + L^c_{nm}(i\omega W_{am})] = -(\Phi_0, g_{cn}),$$

$$\sum_{m=1}^{\infty}[M^a_{nm}A_m + L^a_{nm}(i\omega W_{am})] = (\Phi_0, g_{an}). \tag{3}$$

Здесь $\{W_{am}\}$ — последовательность неизвестных коэффициентов в разложении антисимметричной компоненты колебаний пластины в ряд по собственным функциям $g_{an}(y)$. Правые части уравнений — суть скалярные

произведения потенциала падающего поля Φ_0 на собственные функции симметричных и антисимметричных колебаний. Элементы матрицы M_{nm}^c, M_{nm}^a, L_{nm}^c, L_{nm}^a характеризуют преобразование нормальных колебаний среды в нише в собственные колебания пластины и взаимные преобразования собственных колебаний пластины различных номеров и типов. При этом

$$M_{nm}^c = a_{nm} - (f_m, H_0^{(1)}, g_{cn}); \quad M_{nm}^a = b_{nm} + (f_m, H_0^{(1)}, g_{an});$$

$$L_{nm}^c = c_{nm} - (g_{am}, H_0^{(1)}, g_{cn}), \quad L_{nm}^a = d_{nm} + (g_{am}, H_0^{(1)}, g_{cn});$$

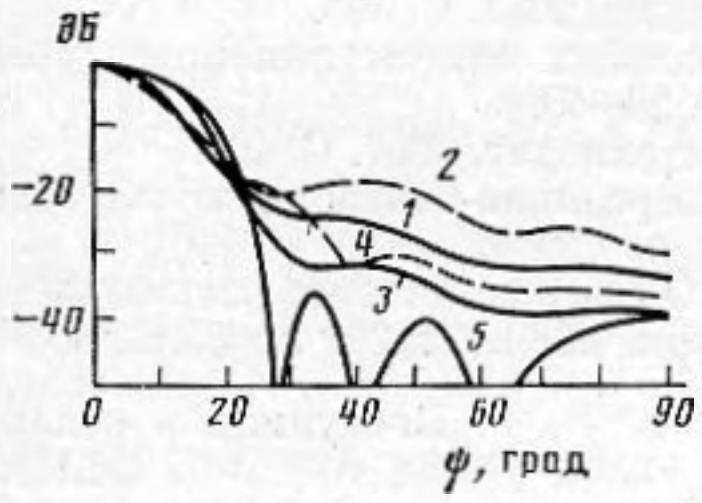
где $f_m(y)$ — собственные функции ниши; $(f, H_0^{(1)}, g) = \frac{i}{2} \iint\limits_{-L/2}^{L/2} f(y) H_0^{(1)} \times \times (y, y') g(y') dy\, dy'$. Вторые слагаемые в формулах для элементов матриц имеют в соответствии с [4] физический смысл сопротивлений излучения одной формы колебаний по другой. Тогда первые слагаемые могут быть интерпретированы как внутренние сопротивления, определяемые параметрами ниши и пластины (громоздкие формулы для a_{nm}, b_{nm}, c_{nm}, d_{nm} здесь опущены).

При численном решении системы (3) следует обратить внимание на два обстоятельства. Первое связано с вычислением элементов матриц, содержащих интегралы вида $(f, H_0^{(1)}, g)$. Путем преобразований их удается свести к интегралам Липшица — Ханкеля от комплексного аргумента [5]. Второе обстоятельство связано с редукцией бесконечной системы уравнений. Исследования показали, что система (3) не удовлетворяет условиям, достаточным для применения метода простой редукции [6]. В связи с этим сходимость последовательности приближенных решений проверялась численным экспериментом. Устойчивые значения были получены при порядках редуцированных матриц $N=20-40$ (для $L \approx 4\lambda$).

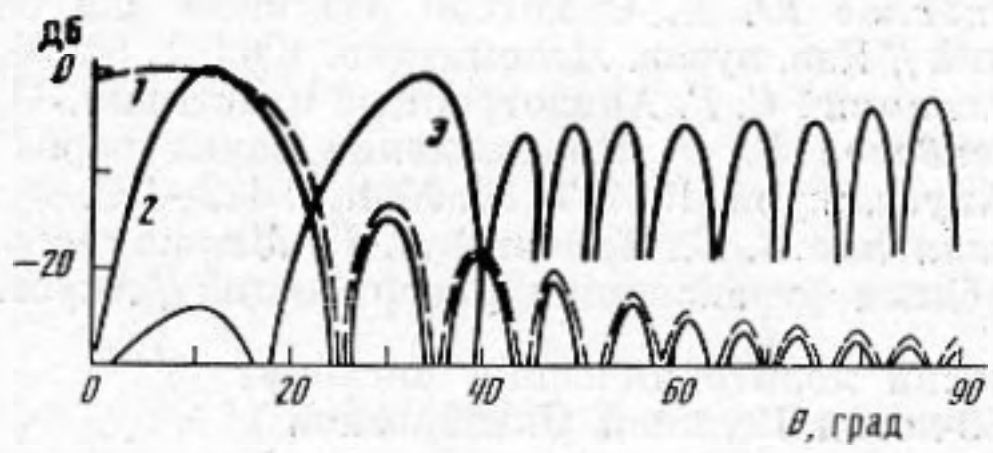
Численные расчеты были проведены при следующих параметрах задачи: размеры ниши $L=3{,}9\lambda$, $H=2\lambda$; импеданс граней и дна $з_1=з_2=-i\cdot 0{,}8$, что соответствует коэффициенту отражения при нормальном падении $-0{,}1$ (в другом варианте — грани жесткие); пластина из ортотропного материала — армированного стеклопластика [7] толщиной $0{,}04\lambda$ (λ — длина волны в среде). Антенна — прямоугольная решетка из 7×21 точечных звукоприемников с шагом $\lambda/2$ — расположена на дне ниши.

Рассмотрим, опираясь на результаты расчетов, влияние параметров пластины и ниши на направленные свойства антенны. Влияние пластины определяется угловой зависимостью ее звукопрозрачности с учетом нагрузки на нишу. Рассчитанные с помощью уравнений (1), (2) угловые зависимости звукопрозрачности бесконечной пластины из стеклопластика в свободном пространстве оказались типичными [4, 8]. Если пластина прикрывает нишу, то оценить ее звукопрозрачность можно, сравнивая звуковое поле в нише, прикрытой пластиной, и в нише без пластины. Так как звуковое поле внутри ниши неоднородно, то поточечное сопоставление неприемлемо и следует использовать интегральный эффект. Например, можно сравнивать эффект на выходе антенны, помещенной в нишу. Следует однако иметь в виду, что результат сравнений в определенной степени будет зависеть от параметров антенны. Можно также сравнить среднеквадратичные значения поля в объеме ниши (или на элементах антенны), являющиеся мерой энергии звукового поля. В работе были получены оценки звукопрозрачности как на основе сравнения эффектов на выходе семиэлементной антенны с равномерным распределением, так и на основе сравнения среднеквадратичных значений поля по семи точкам на дне линии. Мы получили близкие результаты: звукопрозрачность достаточно высока (>-2 дБ) в диапазоне углов падения $0-40°$, а затем довольно быстро снижается до значений $-(11-15)$ дБ при углах $70-90°$. Если при расчете прохождения звука учитывать лишь изгибные колебания, то расчетные значения звукопрозрачности оказываются практически неизменными во всем диапазоне углов падения.

Уменьшение звукопрозрачности пластины при скользящем падении звука приводит к соответствующему изменению уровня бокового поля антенны на 6÷15 дБ при $\psi \in 60, 90°$ для пластины толщиной $0{,}04\lambda$. Проведенные расчеты, в частности, показывают, что для пластины заданной толщины ($0{,}04\lambda$) учет толщинных колебаний оказывается существенным. Аналогичные расчеты для тонкой стальной пластины ($0{,}004\lambda$) подтвердили вывод работ [2, 4] с превалирующей (в этом случае) роли изгибных колебаний.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Диаграммы направленности антенны в нише с тейлоровским распределением чувствительности, $з_2=-i0{,}8$; *1* – $H=2\lambda$, $з_1=\infty$; *2* – $H=5\lambda$, $з_1=\infty$; *3* – $H=2\lambda$, $з_1=-i0{,}8$; *4* – $H=5\lambda$, $з_1=-i0{,}8$; *5* – синтезированная диаграмма направленности, $H=2\lambda$, $з_1=-i0{,}8$

Фиг. 3. Диаграммы направленности антенны в нише с равномерным распределением чувствительности в плоскости ZX: *1* – антенна в свободном поле, $\theta_k=5°$; *2* – $L=3{,}9\lambda$, $H=2\lambda$, $з_1=-i0{,}8$, $з_2=\infty$, $\theta_k=5°$; *3* – $L=0{,}3\lambda$, $H=2\lambda$, $з_1=з_2=-i0{,}8$, $\theta_k=30°$

Рассмотрим влияние параметров ниши. Расчеты производились с учетом лишь изгибных колебаний пластины, чтобы исключить влияние угловой зависимости ее звукопрозрачности. Увеличение глубины ниши с жесткими гранями приводит к росту бокового поля в плоскости ZY для антенны с тэйлоровским распределением (фиг. 2, кривые *1*, *2*), что может быть объяснено исходя из представления о модовой структуре поля в нише, рассматриваемой как отрезок плоского волновода. Заглушение граней снижает уровень боковых лепестков (кривые *3*, *4*) за счет улучшения согласования тейлоровского распределения чувствительности, спадающего к краям антенны, с распределением давления в основной волноводной моде и за счет ослабления высших мод.

Расчеты характеристик направленности антенны в плоскости ZX показали, что они отличаются от аналогичных характеристик для свободного пространства лишь при достаточно скользящих углах падения. Кривая *1* на фиг. 3 изображает диаграмму направленности антенны с равномерным распределением в свободном пространстве, компенсированную в направлении угла скольжения $\theta_k=5°$, а кривая *2* – диаграмму направленности такой же антенны на жестком дне ниши. Падение уровня при скользящих углах обусловлено тем, что падающая на нишу волна преобразуется на ее срезе в нормальные волны, фазовые скорости которых больше скорости звука в свободном пространстве. Угол $\theta=5°$ является более скользящим, чем угол ($\theta=10°$), при котором все моды данного волновода становятся нераспространяющимися. Еще более выразительно этот эффект проявляется в сравнительно узкой нише, для которой угол отсечки больше (кривая *3* на фиг. 3).

Резюмируя сказанное выше, отметим, что размещение антенны в нише заметным образом влияет на ее направленные свойства. В частности, снижается эффективность распределений (например, тейлоровского), вводимых для подавления бокового поля. Представляет интерес синтез распределений для антенн, помещенных в нишу. Применение в данной ситуации метода синтеза, описанного ранее в работе [9], приводит к антенне с пониженным уровнем бокового поля (кривая *5* на фиг. 2).

В заключение авторы выражают благодарность М. И. Карновскому за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галаненко В. Б., Мацыпура В. Т.* Направленность группы точечных приемников, расположенных в нише вблизи мягкого экрана // Акуст. журн. 1981. Т. 27. № 2. С. 187–193.
2. *Лямшев Л. М.* Отражение звука от тонких пластин и оболочек в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 72 с.
3. *Голоскоков Е. Г., Бешенков С. Н.* Упругоакустические задачи динамики трехслойных конструкций. Харьков: Вища школа, 1980. С. 116.
4. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. С. 348.
5. *Агрест М. М., Раппопорт Ю. М., Рикенглаз М. М., Тавдидишвили Б. Б.* Таблицы неполных интегралов Липшица–Ханкеля. М.: Наука, 1982. С. 393.
6. *Грибанов Ю. И.* О методе редукции для бесконечных систем линейных уравнений // Изв. вузов. Математика. 1962. Т. 62. № 1. С. 28–40.
7. *Лехницкий С. Г.* Анизотропные пластинки. М.: Гостехиздат, 1957. С. 460.
8. *Шендеров Е. Л.* Прохождение звука через траверсально-изотропную пластину // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 1. С. 122–129.
9. *Галаненко В. Б., Красный Л. Г., Мацыпура В. Т.* О синтезе антенн, расположенных вблизи отражающих поверхностей // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 5. С. 603–607.

Киевский политехнический институт
им. 50-летия Великой Октябрьской
социалистической революции

Поступила в редакцию
26.III.1986