

где  $L_1$  и  $L_2$  — уровни звукового давления в «шумной» (с источником звука) и «тихой» трубах,  $A$  — эквивалентная площадь звукопоглощения внутренней поверхности «тихой» трубы. Оценки показывают, что использование формулы (3) приемлемо уже при  $f_c \approx 2-3f_k$ , если значения  $L_1$  и  $L_2$  соответствуют усредненным по пространству квадратам величин звукового давления в трубах; здесь основная резонансная частота осевых мод  $f_k = c/(2L)$  [5], где  $L$  — длина более короткой трубы. Заметим, что формула (3) по внешнему виду совпадает с выражением, применяемым для определения звукоизоляции экспериментальным путем [5]; поэтому эффект повышения звукоизоляции должен наблюдаться и при измерении по стандартной методике. Таким образом, звукоизоляция пластины (вне области волнового совпадения) в диапазоне  $\max\{2f_p, 2f_k\} \approx f_c \approx f_{20}$  определяется выражением (2), при  $c/a_2 = f_{02} \approx f_c \approx f_p$  приблизительно соответствует закону массы для нормального падения и с дальнейшим ростом частоты начинает подчиняться закону массы для диффузного падения. На фигуре даны измеренные и рассчитанные по закону массы для нормального падения частотные характеристики звукоизоляции двух одинарных перегородок площадью  $1 \times 1$  м<sup>2</sup> (из древесноволокнистых материалов), установленных в стене площадью  $\sim 3 \times 4,7$  м<sup>2</sup> между помещениями длиной по 6 м (т.е.  $f_p \approx 240$  Гц,  $f_{20} \approx 72$  Гц,  $f_{02} \approx 113$  Гц,  $f_k \approx 28$  Гц). Толщины, поверхностные плотности, основные резонансные частоты изгибных колебаний и граничные частоты волнового совпадения перегородок равны соответственно 0,003 и 0,012 м, 3 и 12 кг/м<sup>2</sup>, 6 и 24 Гц, 10 и 2,5 кГц. Видно, что развитые выше теоретические представления согласуются с экспериментальными данными (так, согласно формуле (2), звукоизоляция перегородок на 63 Гц равна соответственно 16 и 27 дБ).

Заметим, что повышение звукоизоляции на низких частотах, обусловленное одномерностью звуковых полей в помещениях, будет иметь место и при замене пластины слоистой перегородкой: в этом случае величина  $R_0(f)$  в формуле (2) соответствует звукоизоляции слоистой перегородки при  $S = S_0$ .

Автор благодарит С. А. Рыбака за внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Peutz V. Some fundamental measurements on single and double plate structures.— *Acustica*, 1954, v. 4, № 1, p. 281–284.
2. Римский-Корсаков А. В., Седельников Т. Х. Расчет звукоизоляции прямоугольной перегородки.— В кн.: Борьба с шумами и вибрациями. М.: Стройиздат, 1966, с. 341–343.
3. Седов М. С. Аналитическая частотная характеристики звукоизолирующей способности однослойных ограждений.— В кн.: Борьба с шумами и вибрациями. Т. I. Волгоград: Нижневолжский центр научно-технической информации, 1972, с. 62–64.
4. Josse P., Lamure R. H. Transmission du son par une parac simple.— *Acustica*, 1964, v. 14, № 5, p. 266–280.
5. Beranek L. L. Noise Reduction. New York — Toronto — London: Mc Graw — Hill Book Company, 1960, 752 p.
6. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во Московск. ун-та, 1960. 336 с.
7. Лямшев Л. М. Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 74 с.
8. Винокур Р. Ю., Лалаев Э. М. Метод расчета звукоизоляции тройных остеклений с герметичными притворами.— В кн.: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1979, с. 37–43.

Московский научно-исследовательский и проектный институт типового и экспериментального проектирования

Поступила в редакцию  
20.II.1981

УДК 534.222

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЗВУКА

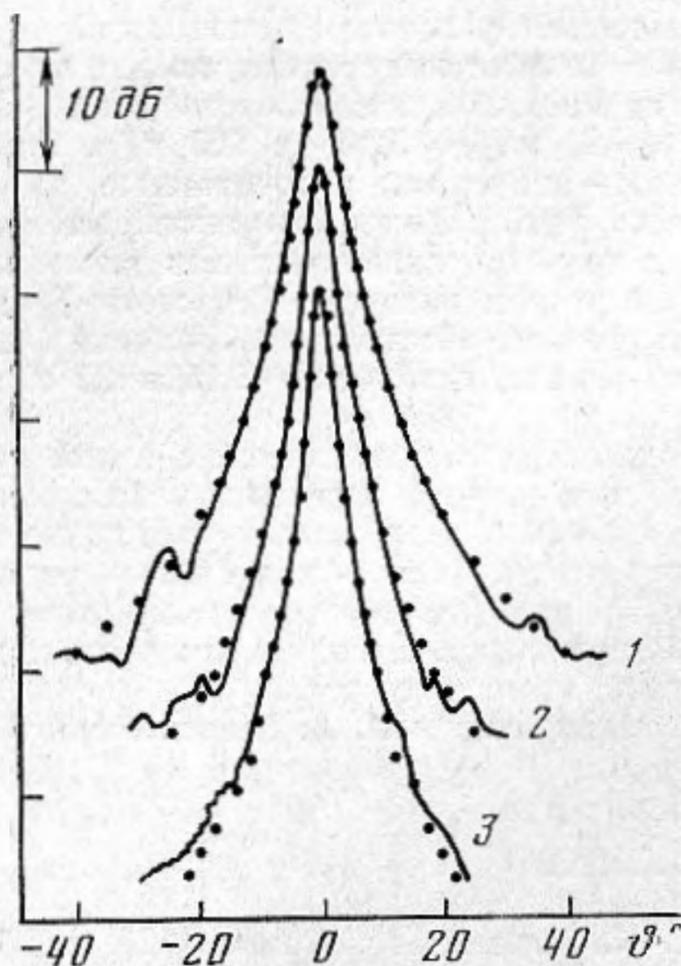
Калачев А. И., Островский Д. Б.

В работах [1–4] вторичное поле разностной частоты исследуется вдали от области взаимодействия первичных пучков. Однако в экспериментах часто измерения проводятся в самой области взаимодействия. На невысоких первичных частотах эта область может простирается на сотни и тысячи метров, вследствие чего измерение вторичного поля вдали от области взаимодействия может оказаться практически невозможным. Кроме того, иногда параметрический излучатель необходимо использовать для работы на небольших расстояниях. Поэтому представляются важными исследования ближнего поля параметрического излучателя звука, т. е. поля в самой области взаимодействия или вблизи этой области.

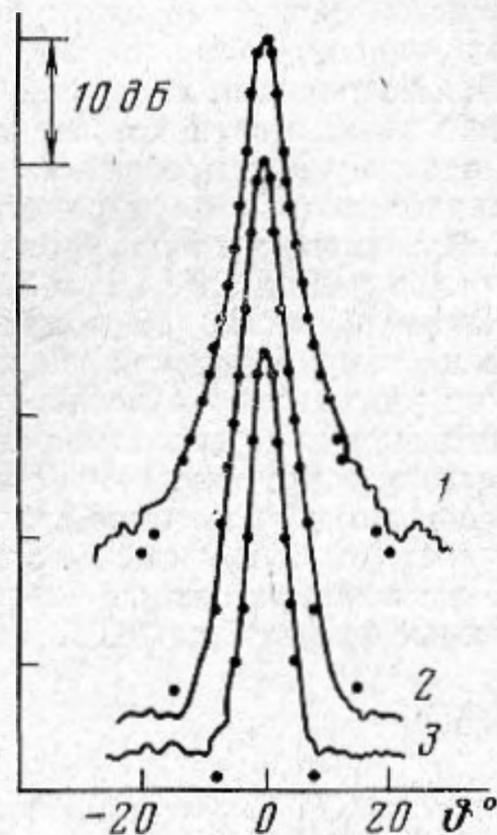
В работе [5] приведены результаты приближенного расчета поля разностной частоты  $\omega_- = \omega_1 - \omega_2$  внутри области взаимодействия в идеальной среде. В этой работе первичные поля от плоского поршневого излучателя аппроксимировались сферическими волнами; для аксиально-симметричных полей объемный интеграл по источникам был сведен к выражению

$$p(x', t) = \frac{R_0^2 p_1 p_2 (1 + B/2A) \omega_-^2}{4\pi \rho_0 c_0^4} \operatorname{Re} \left[ e^{-i\omega_- t} \int_0^\pi D_1(\theta) D_2(\theta) g(\theta, \vartheta) \sin \theta d\theta \right], \quad (1)$$

$$\text{где } g(\theta, \vartheta) = 2\pi e^{ik_- l} \int_0^\infty \frac{e^{ik_- lx} dx}{[(x+a_1)^2 - a_2^2]^{1/2}},$$



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Угловые зависимости звукового поля разностной частоты 5 кГц для расстояний  $l=20, 60$  и  $120$  м (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Сплошные кривые — экспериментальные, точки — теоретические значения

Фиг. 2. Угловые зависимости звукового поля разностных частот 5,15 и 25 кГц (кривые 1, 2 и 3 соответственно) для расстояния  $l=90$  м. Сплошные кривые — экспериментальные, точки — теоретические значения

$p_{1,2}$  — амплитуды давления в первичных пучках на расстоянии  $R_0 = S/\lambda$ ,  $S$  — площадь излучателя,  $\lambda$  — длина волны на частоте  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$ ,  $B/A$  — параметр нелинейности среды,  $\rho_0$  — плотность среды,  $c_0$  — скорость звука,  $l$  — расстояние от излучателя до точки наблюдения,  $D_{1,2}(\theta)$  — характеристики направленности излучателя на частотах  $\omega_{1,2}$ ,  $\vartheta$  — угол наблюдения,  $x'$  — радиус-вектор точки наблюдения,  $k_- = \omega_-/c_0$ ,  $a_1 = 1 - \cos \vartheta \cos \theta$ ,  $a_2 = \sin \vartheta \sin \theta$ . Функция  $g(\theta, \vartheta)$  представляется в виде сходящихся рядов, что позволяет в достаточном приближении проводить расчет вторичного поля.

Из выражения (1) видно, что угловая зависимость звукового поля разностной частоты описывается функцией

$$F(\vartheta) = \int_0^\pi D_1(\theta) D_2(\theta) g(\theta, \vartheta) \sin \theta d\theta. \quad (2)$$

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию ближнего поля параметрического излучателя звука и сравнению полученных результатов с теоретическими, рассчитанными по формуле (2).

Эксперимент был поставлен в открытой пресной воде, при глубине места 30 м; дно водоема илистое. Первичные пучки с частотами колебаний 80–115 кГц создавались круглым поршневым излучателем диаметром 34 см, который был опущен на глубину 12 м. Электрическая мощность, подводимая к излучателю, составляла около 70 Вт, при этом давление в первичных пучках достигало  $1,5 \cdot 10^5$  Па·м. Измерения в первичном и вторичном звуковых полях проводились на расстояниях 20, 40, 60, 90 и 120 м от излучателя.

На фиг. 1 приведены угловые зависимости звукового поля разностной частоты  $f_1 - f_2 = 5$  кГц для расстояний  $l = 20, 60$  и  $120$  м (кривые 1, 2 и 3 соответственно), полученные при взаимодействии двух пучков с исходными частотами колебаний  $f_1 = 105$  и  $f_2 = 100$  кГц. Сплошные кривые — данные эксперимента, точки — значения, рассчитанные по формуле (2). По оси ординат отложены значения функции  $20 \lg |F(\theta)/F(0)|$  в дБ, по оси абсцисс — значения угла наблюдения  $\theta$  в градусах. Из фиг. 1 видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов, а также то, что с увеличением расстояния  $l$  угловая зависимость обостряется. Значения ширины угловой зависимости по уровню  $-6$  дБ для расстояний  $l = 20, 60$  и  $120$  м соответственно равны  $5,8^\circ, 4,1^\circ$  и  $3,9^\circ$ . Экспериментальный факт обострения угловой зависимости параметрического излучения с ростом отношения  $l/\lambda$  подтверждает аналогичный теоретический результат работы [5] и соответствует общепонятной физической картине для волновых процессов: для одной и той же длины волны с увеличением длины антенны угловая зависимость излученного ею поля обостряется. Это обстоятельство свидетельствует также и о том, что измерения проводились в ближней зоне параметрического излучателя.

Фиг. 2 относится к случаю, когда измерения угловых зависимостей звукового поля были проведены на одном расстоянии  $l = 90$  м от излучателя, но для различных разностных частот  $f_1 - f_2 = 5,15$  и  $25$  кГц (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Значения первичных частот при этом были равны  $f_2 = 80$  и  $f_1 = 85, 95$  и  $105$  кГц. Сплошные кривые — экспериментальные данные, точки — значения, рассчитанные по формуле (2). Обозначения на фиг. 2 те же, что и на фиг. 1. Видно, что экспериментальные угловые зависимости хорошо согласуются с теоретическими. Анализ также показывает, что для фиксированного расстояния  $l$  с ростом разностной частоты  $f_1 - f_2$  угловая зависимость поля параметрического излучения обостряется. Значения ширины угловой зависимости на уровне  $-6$  дБ для разностных частот  $5,15$  и  $25$  кГц соответственно равны  $5,1^\circ, 4,1^\circ$  и  $3,8^\circ$ .

Таким образом, для получения необходимой для практических целей характеристики направленности параметрической излучающей антенны в ближнем поле следует учитывать не только значения исходных и разностных частот, но и расстояние, для которого такая антенна используется. Экспериментальные результаты показывают, что теоретическая модель [5] параметрического излучателя звука, работающего в указанном выше диапазоне первичных и вторичных частот, хорошо описывает угловую зависимость ближнего поля этого излучателя.

В заключение авторы благодарят В. Г. Манишина и И. А. Шерешевского за выполненные расчеты на ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Westervelt P. J. Parametric acoust array.— J. Acoust. Soc. Amer., 1963, v. 35, № 4, p. 535–537.
2. Беркгей Х. О. Некоторые явления в подводной акустике, связанные с волнами конечной амплитуды. Подводная акустика / Под ред. Бреховских Л. М. М.: Мир, 1970. (Пер. с англ.).
3. Berctay H. O., Leahy D. J. Farfield performance of parametric transmitters.— J. Acoust. Soc. Amer., 1974, v. 55, № 3, p. 539–546.
4. Moffett M. B., Mellen R. H. Model for parametric acoustic sources.— J. Acoust. Soc. Amer., 1977, v. 61, № 2, p. 325–337.
5. Rolleigh R. L. Difference frequency pressure within the interaction region of a parametric array.— J. Acoust. Soc. Amer., 1975, v. 58, № 5, p. 964–971.

Институт прикладной физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
13.VII.1981

УДК 534.232

#### ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АНТЕНН В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ ПОМЕХ

*Карновский М. И., Шоцкий Б. И.*

Рассмотрим плоскую прямоугольную антенную решетку, составленную из точечных приемников, с количеством элементов, равным  $M \times N$  ( $M$  и  $N$  — нечетные целые числа). Расположим прямоугольную систему координат таким образом, чтобы координаты элементов представить в виде

$$\begin{aligned} x_{mn} &= md; \quad m=0; \pm 1; \pm 2; \dots \pm (M-1)/2, \\ y_{mn} &= nd; \quad n=0; \pm 1; \pm 2; \dots \pm (N-1)/2, \\ z_{mn} &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $d$  — шаг решетки, в дальнейшем полагаем равным  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  — длина волны сигнала.