

5. Перенечко И. И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 168 с.
6. Демиденко Т. Ф., Шеняевский Л. А., Шмальгаузен В. И. Интерференционная установка для измерения малых акустических колебаний // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 11. С. 2448–2449.

Московский институт связи

Поступило в редакцию
18.06.90

УДК 534.21

© 1991 г.

А. Г. Иванов-Ростовцев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СТЕРЖНЯ НА ЕГО ДИАГРАММУ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА В ВОДЕ

В экспериментах по рассеянию звука стержнем в области низких частот наблюдалось эффективное переизлучение звука, характеризуемое возбуждением изгибных, продольных и сдвиговых волн в стержне и проявляющееся в виде устойчивых максимумов в угловой диаграмме обратного рассеяния [1, 2].

При проведении указанных (в том числе и некоторых теоретических [3, 4]) исследований, как правило, рассматривают случаи значительных относительных длин стержня, соответствующих неравенству $l/d \gg 1$, где l , d — длина и диаметр стержня. Такие случаи связаны с приближением к асимптотике тонкого стержня бесконечной длины. При уменьшении данного отношения вплоть до единицы точность приближения будет ухудшаться и в случае $l \sim d$ необходимо использовать приближение к другой простейшей геометрической форме — сфере.

В связи с этим возникает интерес к исследованию переходной области, ограниченной двумя указанными асимптотиками. Результаты таких экспериментальных исследований представлены в данной работе. В частности, исследовались вопросы влияния геометрии стержня на характеристики его диаграммы направленности обратного рассеяния в воде при возбуждении и переизлучении первой квазиизгибной (в терминологии [5]) моды колебаний. Максимумы в диаграмме, обусловленные возбуждением данной моды, обладают наиболее высокими уровнями отражения и угловой шириной. В принципе используемый подход может быть перенесен и на исследования максимумов, соответствующих другим модам колебаний и наблюдаемых в ходе эксперимента, например обусловленных возбуждением нулевой квазиизгибной моды или первой квазисдвиговой моды цилиндра.

Подробное описание методики эксперимента приведено в [2]. Кратко ее можно охарактеризовать следующим образом. Стержень подвешивался горизонтально в бассейне ($8 \times 1,5 \times 2$ м), наполненном водой. При помощи поворотного устройства осуществлялось вращение стержня вокруг вертикальной оси. Облучение производилось импульсно-тональным сигналом при использовании совмещенного излучателя-приемника. Частота импульсного заполнения — 50, 100, 200, 1000 кГц, длительность импульса — 100 мкс, период повторения импульсов — 50 мс. При приеме использовалось стробирование по дальности. Уровень эхо-сигнала записывался на самописец.

Угловая зависимость уровня сигнала, соответствующая отражению от стального стержня размерами $l=3,7$ см, $d=0,4$ см при частоте облучения $f=200$ кГц, представлена в полярных координатах на рис. 1. На диаграмме отчетливо просматривается максимум переизлучения шириной $\Delta\varphi$, соответствующий возбуждению в стержне изгибной волны [2]. Причем уровень данного максимума A соизмерим с уровнем зеркального максимума A_0 .

Зависимость угла φ между направлением максимума A_0 и осью стержня от частоты облучения исследовалась в [2], где было показано, что при увеличении частоты облучения угол φ увеличивается, а при уменьшении частоты — уменьшается. Для исследования влияния относительной длины стержня на параметры данного максимума были изготовлены стержни из различных материалов с длинами, изменяющимися от 1,5 до 10 см и диаметрами от 0,1 до 1,0 см. Материалы, из которых изготовлялись стержни, — сталь, алюминий, медь, латунь, олово, графит, эбонит, пластик. Результаты экспериментов (генерализация 347 записей диаграмм рассеяния) представлены на рис. 2, 3, где с целью удобства представления данных была введена частота нормировки $N=c_{пр}/(\pi\sqrt{ld})$, где $c_{пр}$ — скорость продольных волн в

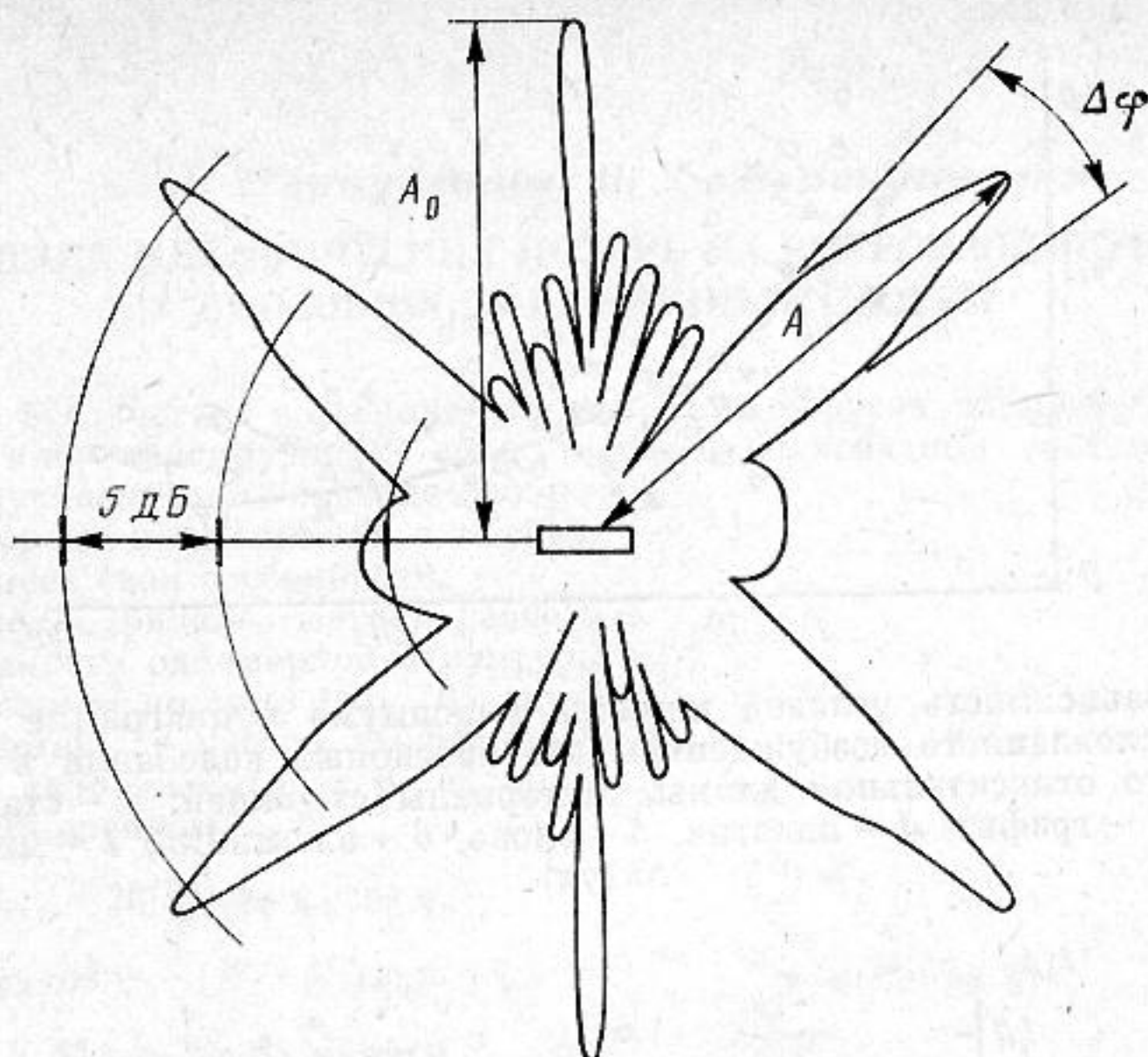


Рис. 1. Характерная диаграмма рассеяния звука стержнем в воде в области низких частот

материале стержня. Из рис. 2 следует, что угловая ширина максимума A_0 возрастает с уменьшением l/d . Это связано с уменьшением разрешающей способности воздействия на локационной частоте. Увеличение относительной частоты f/N приводит к уменьшению $\Delta\varphi$, так как разрешающая способность в этом случае увеличивается. Рисунок 3 показывает, что относительный уровень максимума A_0 при изменении частоты воздействия испытывает осцилляции, которые могут быть связаны с гармониками длины l .

В целом результаты, приведенные на рис. 2, 3, показывают, что в области низких частот при уменьшении относительной длины (l/d) стержня диаграмма рассеяния звука стремится к изотропной форме, соответствующей отражению от сферы. В связи с этим любопытно оценить границы частотного диапазона, соответствующего эффективному переизлучению звука за счет возбуждения изгибной моды колебаний стержня. Из рис. 3 следует, что указанный диапазон соответствует окрестности частоты $f/N \approx 1$ (показан стрелкой), причем «сверху» данный диапазон ограничивается частотой области аномальной дисперсии в стержне $f_v = c_R/\lambda = c_{пр}/\pi d$, где c_R — скорость волны Рэлея, а «снизу» — наименьшей модой колебаний по длине $f_n \approx c_{изг}^2 / \pi d c_{пр}$, где $c_{изг}$ — фазовая скорость изгибной волны в стержне (в данном случае эта скорость равна скорости звука в воде $c_{зв}$). В этом случае при $f < f_n$ диаграмма рассеяния будет изотропной (аналогичной отражению от сферы), а при $f > f_v$ — будет соответствовать высокочастотным приближениям (которые также с успехом применяются в случае рассеивателя сферической формы). В итоге получаем диапазон частот эффективного переизлучения изгибной моды стержня в пределах $f_n < f < f_v$, а при $f < f_n = (c_{зв}/4c_{пр})^2 \sqrt{l/d}$ и $f > f_v = \sqrt{l/d}$ диаграмма будет описываться закономерностями, аналогичными для сферы. Любопытно, что при исследовании указанного диапазона частот, соответствующего возбуждению нулевой квазиизгибной моды (квазиизгибной моды или в терминологии [2] — продольной моды) колебаний стержня, получим характерный диапазон, определяемый как

$$\sqrt{d/l} < f/N < \sqrt{l/d}, \quad (1)$$

откуда следуют границы влияния геометрии стержня на низкочастотный диапазон возбуждаемых колебаний, проявляющихся в виде переизлучения звука. Действительно, при уменьшении относительной длины l/d диапазон (1) будет сужаться, и в процессе рассеяния начнут преобладать закономерности, характерные для сферы. В случае увеличения относительной длины стержня диапазон (1) будет описывать колебания, характерные для стержневой формы, переходящие в пределе ($l/d \rightarrow \infty$) в колебания стержня бесконечной длины.

В заключение хотелось бы отметить целесообразность проведения аналогичных

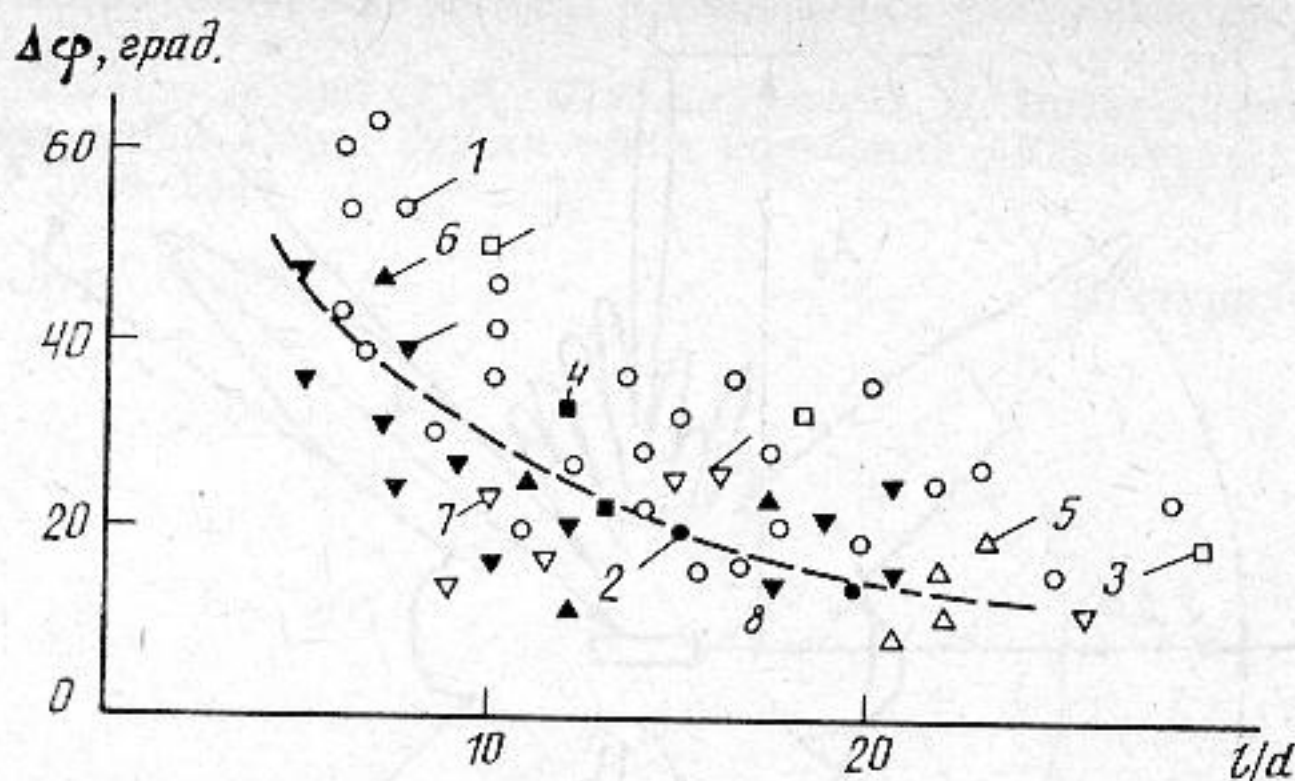


Рис. 2. Зависимость угловой ширины максимума в диаграмме рассеяния, обусловленного возбуждением квазиизгибных колебаний в стержне, от его относительной длины. Материалы стержней: 1 — сталь, 2 — эбонит, 3 — графит, 4 — пластик, 5 — олово, 6 — алюминий, 7 — медь, 8 — латунь

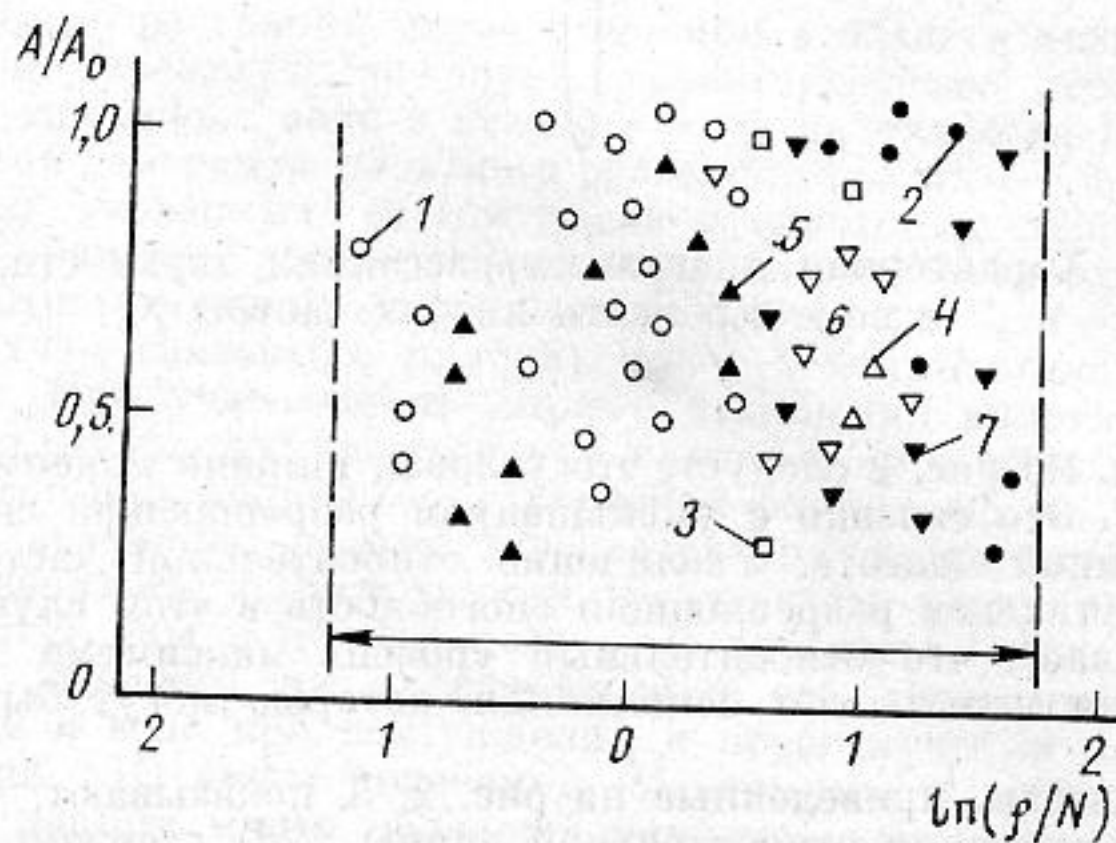


Рис. 3. Частотная зависимость относительного уровня максимума, обусловленного возбуждением квазиизгибных колебаний в стержнях из: 1 — стали, 2 — эбонита, 3 — графита, 4 — олова, 5 — алюминия, 6 — меди, 7 — латуни

исследований по рассеянию звука тонкой пластиной, поскольку в области низких частот нулевая и первая квазиизгибные волны (или соответственно продольная и изгибная волны по классификации [2]) в стержне обнаруживают многие общие черты с соответственно нулевыми симметричной и антисимметричной волнами Лэмба в тонкой пластине [6]. В данном случае исследуемая переходная область будет ограничиваться асимптотиками «пластина» — «сфера».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Faran J. J.* Sound Scattering by Solid Cylinders and Spheres // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1951. V. 23. P. 405–418.
2. *Лямшев Л. М.* Отражение звука тонкими пластинками и оболочками в жидкости. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 115 с.
3. *Лямшев Л. М.* Рассеяние звука тонким ограниченным стержнем // *Акуст. журн.* 1958. Т. 4. № 1. С. 51–58.
4. *Лямшев Л. М.* Рассеяние звука упругими цилиндрами // *Акуст. журн.* 1959. Т. 5. № 1. С. 38–63.
5. *Музыченко В. В., Рыбак С. А.* Излучение звука вытянутой оболочкой вращения // *Докл. АН СССР.* 1989. Т. 304. № 3. С. 586–590.
6. *Maze G., Izbicki J. L., Ripoche J.* Resonances of Plates and Cylinders: Guided Waves // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1985. V. 77. P. 1352–1358.

Поступило в редакцию
27.04.90