

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222

## САМОВОЗДЕЙСТВИЕ И БИСТАБИЛЬНОСТЬ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Андреев В. Г., Армеев В. Ю., Карabutov А. А., Руденко О. В., Сапожников О. А.

С ростом уровня звука в сильно поглощающих средах проявляются тепловые нелинейности, кубичные по полю. Скорость распространения волны начинает зависеть от ее интенсивности [1]; это в свою очередь может влиять на амплитуду звука. При локализации поля в виде пучка тепловое самовоздействие искривляет фазовый фронт, вследствие чего наблюдается эффект самофокусировки [2, 3]. Еще заметнее нелинейная добавка к фазе изменяет амплитуду колебаний в резонаторе, если соответствующий сдвиг частоты сравним с шириной линии резонанса. Искажение формы линии и смещение частоты продольной моды за счет теплового самовоздействия наблюдались в воздушных резонаторах [4], но не были объяснены. Аналогичные эффекты видели и в твердотельных резонаторах; в работе [5], кроме того, обнаружена бистабильность. Однако в резонаторах с жидкими средами эти явления не наблюдались, так как здесь трудно избавиться от импедансного характера границ и сконструировать высокочастотную систему. В этих условиях нелинейные эффекты должны быть выражены гораздо сильнее, чтобы обеспечить достаточную отстройку от резонансной частоты.

В данной работе сообщается о наблюдении теплового самовоздействия и бистабильности в резонаторе с жидкостью. Одним из зеркал открытого резонатора была пьезокерамическая пластина диаметром 3 см, закрепленная в металлической коробке. Второе зеркало (слой дюралюминия толщиной 2 см) крепилось стержнями на расстоянии 15 см. Его внутренняя поверхность была сферической с кривизной  $1/40 \text{ см}^{-1}$ . Более подробно конструкция описана в [6]. Приняты меры по устранению влияния внешнего нагревателя — пьезопластины. С этой целью через коробку вдоль пластины прокачивалась охлаждающая жидкость. Кроме того, ось резонатора ориентировалась вертикально, а излучатель находился сверху; при такой геометрии пьезопластина могла нагревать лишь тонкий пограничный слой, не вызывая конвекции в исследуемом объеме.

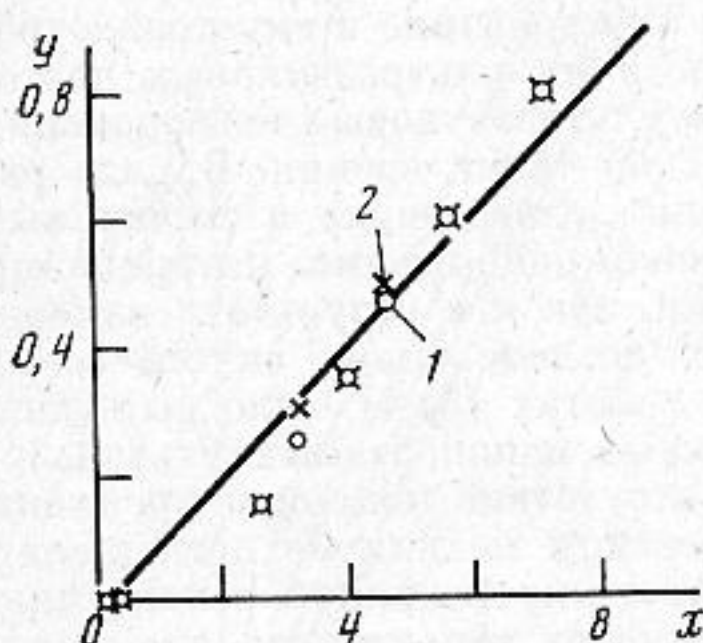
Напряжение с частотой  $\sim 1 \text{ МГц}$  от синтезатора Ч6-31 через аттенюатор и усилитель мощности подавалось на излучатель. Аттенюатор был калиброван в числах Маха волны накачки  $M_H = u/c$ , где  $u$  — амплитуда скорости колебаний пьезопластины при отсутствии второго зеркала (излучение в свободное пространство),  $c$  — скорость звука. Калибровка проводилась по измерениям в дальнем поле с помощью гидрофона, чувствительность которого была известна с точностью 20% [7].

Амплитуда волны в резонаторе зависит от отстройки частоты от резонанса в отсутствие самовоздействия  $(M/M_{\max})^2 = F((f-f_0)/f_0)$ , где  $M$  — число Маха волны,  $F$  — функция, описывающая форму линии продольной моды,  $f_0$  — резонансная частота,  $M_{\max}$  — число Маха при  $f=f_0$ . При самовоздействии форма линии искажается, так как разным  $f$  соответствуют разные значения резонансной частоты  $f_{\text{рез}}$ . Действительно, резонансная частота продольной моды зависит от скорости звука (линейно):  $f_{\text{рез}} \sim c$ . Скорость звука меняется с температурой  $T$ :  $c \approx c_0 + (\partial c / \partial T)_p \cdot (T - T_0)$ , где  $T_0$  — начальное значение температуры,  $c_0 = c(T_0)$ ,  $c_0^{-1} (\partial c / \partial T)_p$  — температурный коэффициент скорости звука. Прирост температуры в установившемся режиме в свою очередь определяется амплитудой волны внутри резонатора — среда нагревается из-за поглощения звука. Таким образом, резонансная частота зависит от акустического числа Маха:  $f_{\text{рез}} = f_0 + \Delta f_{\text{рез}}(M/M_{\max})$ , где  $\Delta f_{\text{рез}}$  — смещение резонанса из-за самовоздействия. Это обуславливает искажение формы линии:  $(M/M_{\max})^2 = F((f-f_0)/f_0 - \Delta f_{\text{рез}}/f_0)$ . Конкретный вид функции  $\Delta f_{\text{рез}} = \Delta f_{\text{рез}}(M/M_{\max})$  рассчитать затруднительно, так как он определяется характером возникающих конвективных и акустических течений, расчет которых является самостоятельной проблемой. Сказанное относится также и к анализу процесса установления. Зависимость  $\Delta f_{\text{рез}}(M/M_{\max})$  находилась экспериментально.

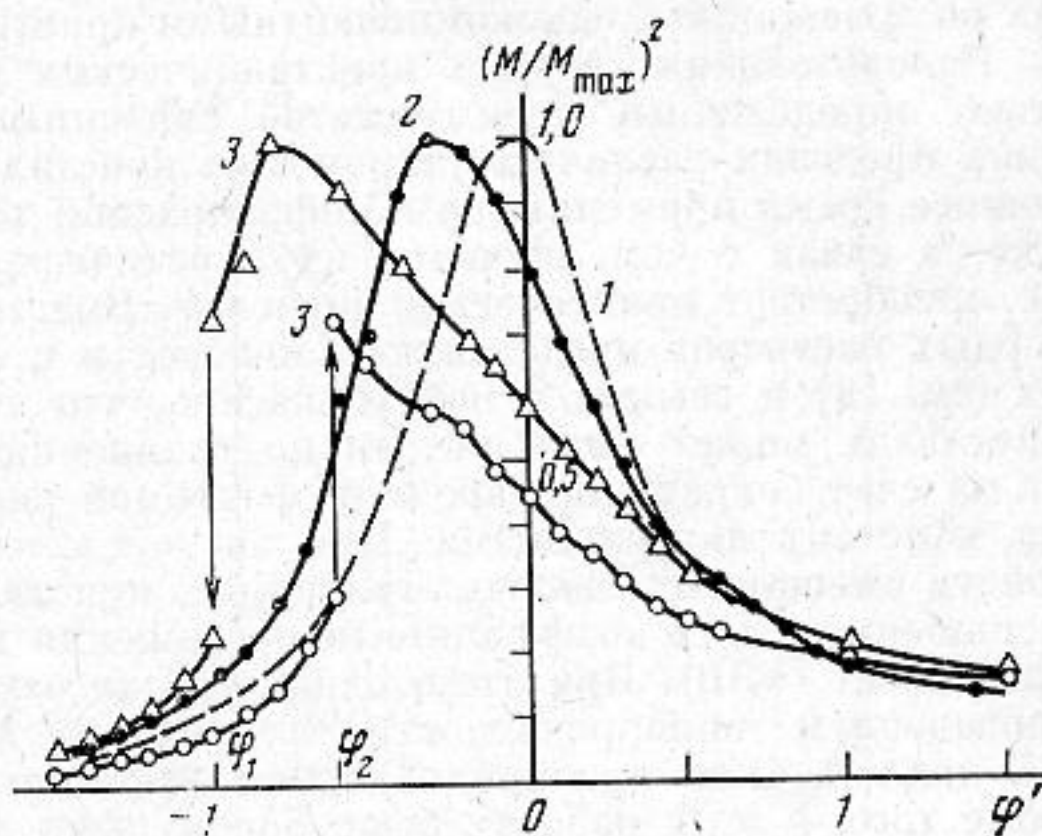
Измерения проводились в кювете  $20 \times 30 \times 60 \text{ см}^3$ , заполненной трансформаторным маслом. Дно заглушалось листом резины. Вне резонатора на расстоянии 5 см от зеркал устанавливался точечный гидрофон, сигнал которого был пропорционален амплитуде волны в резонаторе. На фиг. 1 приведены результаты измерений частоты  $f_{\text{рез}}^*$ , соответствующей  $M_{\max}$ ;  $f_{\text{рез}}^*$  есть резонансная частота при наличии самовоздействия. Видно, что ее отличие от резонансной частоты при малой накачке зависит линейно от  $M_H^2$ . Совпадение зависимостей 1, 2 указывает на то, что геометрия эксперимента действительно исключала влияние нагрева пьезопластины. Смещение резонанса в сторону низких частот объясняется тем, что в масле  $dc/dT <$

$<0$ . В воде  $dc/dT > 0$ , резонансная частота, напротив, должна увеличиваться. Это явление действительно наблюдалось в экспериментах [6].

С учетом измеренной зависимости  $\Delta f_{\text{рез}}(M_n^2)$  запишем  $m = F(\varphi + m\xi)$ , где  $m = (M/M_{\text{max}})^2$ ,  $\varphi = (f - f_0)/f_0$ ,  $\xi = 0,14 \cdot 10^{10} M_n^2$ . Отсюда следует, что наряду со смещением резонанса линия искажается несимметричным образом — с ростом  $\xi \sim M_n^2$  все больше «заваливается» влево и при  $\xi > \xi_{\text{кр}} = (dF/d\varphi)_{\text{max}}^{-1}$  появляется область неоднозначности, где возможны два устойчивых состояния. Расчет дает  $M_n^{\text{кр}} = 2 \cdot 10^{-5}$ . Измерения проводились как при  $M_n < M_n^{\text{кр}}$ , так и при  $M_n > M_n^{\text{кр}}$ . Форма линии снималась по точкам: частота менялась с шагом 100 Гц; после каждого переключения частоты делалась пауза  $\sim 1$  мин с тем, чтобы закончились процессы установления. Результаты приведены на фиг. 2. Кривая 1 — это форма линии, когда  $M_n \ll M_n^{\text{кр}}$  и самовоздействием можно пренебречь. При увеличении накачки форма линии начи-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Сдвиг резонансной частоты продольной моды в зависимости от числа Маха накачки  $M_n$ ;  $y = (f_0 - f_{\text{рез}}^*)/f_0$ ,  $x = 10^{10} \cdot M_n^2$ . Прямая  $y = 0,14x$ : 1 — измерения при выключенном охлаждении излучателя, 2 — при охлаждении

Фиг. 2. Искажение формы линии резонатора при различных уровнях накачки; 1—3 соответствуют  $M_n = 0,16 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,6 \cdot 10^{-5}$ ;  $2,7 \cdot 10^{-5}$

нает искажаться, наклоняясь в сторону низких частот (кривая 2). Кривая 3 снята при  $M_n > M_n^{\text{кр}}$ . Измерения формы линии проводились сначала с увеличением частоты, затем с ее уменьшением. Результаты получились разными: наблюдается характерный гистерезис. При этом переходы в точках  $\varphi' = \varphi_1, \varphi_2$ , показанные на фиг. 2 стрелками, происходили скачком; время перехода не превышало 10 с. Область  $\varphi_1 < \varphi' < \varphi_2$  является областью бистабильности. Результаты измерений соответствуют проведенной оценке  $M_n^{\text{кр}}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schreuer E. Präzisionsmessungen der Ultraschallgeschwindigkeit in verschiedenen Flüssigkeiten und ihre Bedeutung für die Frage der Schalldispersion sowie für die Methodik der Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen.— Akust. Zs., 1939, v. 4, p. 215.
2. Андреев В. Г., Карабутов А. А., Руденко О. В., Сапожников О. А. Наблюдение самофокусировки звука.— Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 41, вып. 9, с. 381–384.
3. Ассман В. А., Бункин Ф. В., Верник А. В., Ляхов Г. А., Шипилов К. Ф. Наблюдение теплового самовоздействия звукового пучка в жидкости.— Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 41, вып. 4, с. 148–150.
4. Donald B. Cruikshank Jr. Experimental Investigation of Finite — Amplitude Acoustic Oscillation in a Closed Tube.— JASA, 1972, v. 52, № 3, (pt 2), p. 1024–1036.
5. Casperson L. W., Davis L. M., Harvey J. D. Thermal hysteresis in acoustic resonators.— JASA, 1982, v. 71, № 6, p. 1412–1416.
6. Андреев В. Г., Гусев В. Э., Карабутов А. А., Руденко О. В., Сапожников О. А. Повышение добротности нелинейного акустического резонатора с помощью селективно поглощающего зеркала.— Акуст. журн., 1985, т. 31, № 2, с. 275–276.
7. Андреев В. Г., Карабутов А. А., Руденко О. В. Метод калибровки широкополосных гидрофонов в ультразвуковых пучках конечной амплитуды.— Вестн. МГУ. Сер. 3, Физ., астрон., 1984, т. 25, № 4, с. 74–77.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Поступило в редакцию  
25.XII.1985