

НАБЛЮДЕНИЕ САМОФОКУСИРОВКИ ЗВУКА

В.Г.Андреев, А.А.Карабутов, О.В.Руденко, О.А.Сапожников

Впервые наблюдалось явление самофокусировки звука в жидкости. Измерены распределения амплитуды и фазы волны в поперечном сечении пучка в разные моменты времени.

1. Изложены результаты экспериментов, в которых впервые наблюдалась самофокусировка звука (СФЗ). Обнаружено сужение пучка, увеличение интенсивности звука на оси,

изменение кривизны вольфового фронта. Исследован процесс формирования акустического поля после включения излучателя. Наблюдаемые явления могут быть объяснены в рамках теплового механизма самовоздействия, связанного с уменьшением скорости звука в среде, нагреваемой мощной акустической волной.

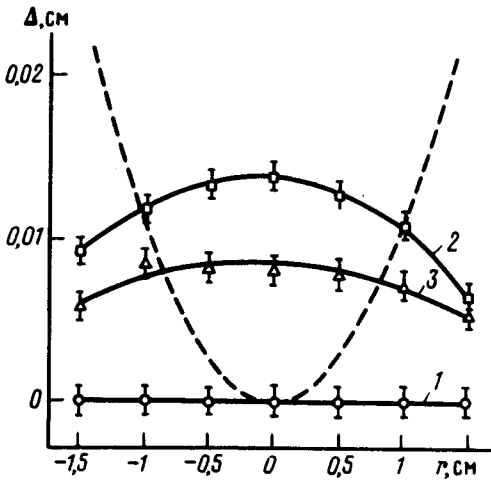


Рис. 1

Рис. 1. Сдвиг $\Delta(r)$ фронта волны из-за самовоздействия в трансформаторном масле. Расстояние от излучателя $x = 45$ см, мощность 8 Вт. Кривые 1, 2, 3 соответствуют временам 0, 20 и 40 с после включения УЗ. Штриховая кривая $\Delta = r^2/2x$ — невозмущенный фронт

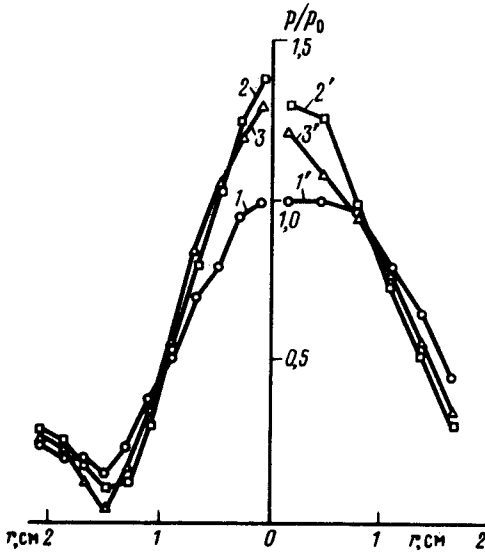


Рис. 2

Рис. 2. Изменение профиля давления p в пучке при СФЗ. p_0 — давление на оси при $t = 0$. Левая половина на рисунка соответствует глицерину и $x = 30$ см, правая — маслу и $x = 45$ см. Мощность 12 Вт. Кривые 1 (1'), 2 (2'), 3 (3') сняты при $t_1 = 0, t_2 = 50$ с (15 с), $t_3 = 100$ с (40 с). t_2 — время наибольшей СФЗ.

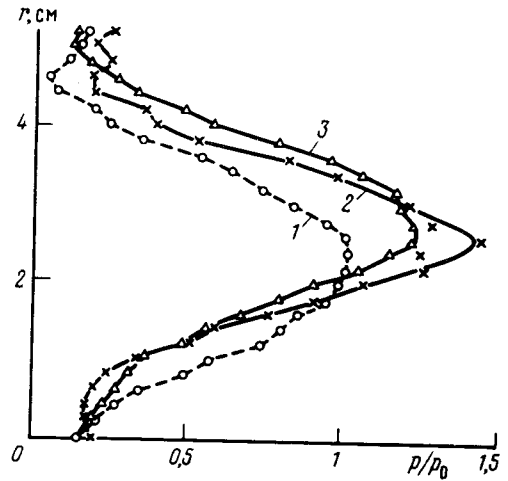


Рис. 3

Рис. 3. "Всплывание" звукового пучка под действием конвекции. Измерения проведены в глицерине на расстоянии 40 см при тех же временах и мощности звука что и на рис. 2

2. Самофокусировка является одним из принципиальных нелинейных волновых эффектов. Она хорошо изучена в оптике ¹, теоретически обсуждалась ² и рассчитана ^{3, 4} применительно к акустике. Однако экспериментально эффект СФЗ до сих пор не наблюдался.

В теоретических работах по СФЗ используется подход, аналогичный описанию самофокусировки света. Однако СФЗ имеет выраженную специфику, которую необходимо учитывать.

Так, при нагревании звуком жидкости передается импульс, на пять порядков **больший**, чем при поглощении равной световой энергии; возникающие течения ⁵ оказывают дефокусирующее действие на пучок ⁶. Процесс разгона и скорость течений можно замедлить, используя специальные свойства кюветы и заполняющей жидкости. Конкурируют с СФЗ и квадратичные нелинейные эффекты — генерация широкого спектра гармоник, образование разрывов ⁵ и т. д. Разумеется, нелинейное затухание ударных волн может увеличить температурные градиенты и усилить полезный эффект. При этом, однако, формируется сложная пространственно-временная структура поля и смысл самого понятия СФЗ следует видоизменить. Самофокусировка пучков, содержащих разрывы поля — проблема, открытая для теоретических и экспериментальных исследований.

3. СФЗ наблюдалась нами в глицерине и трансформаторном масле. Ультразвук возбуждался пьезокерамическим излучателем диаметром $d = 3$ см на частоте $f = 1$ МГц. Интенсивность не превышала 3 Вт/см^2 ; при этом акустическое число Рейнольдса было меньше двух и нелинейные искажения формы волны проявлялись слабо. Типичная для акустических излучателей неоднородность ближнего поля препятствовала проявлению СФЗ на расстояниях, меньших длины прожекторной зоны $\pi d^2 f / 4c \sim 30$ см. Поэтому измерения амплитуды и фазы проводились в дальней зоне, где осцилляции поля вдоль и поперек оси пучка сглажены, но фронт волны искривлен из-за сферической расходимости.

Звук принимался широкополосным гидрофоном. Его положение фиксировалось, в режиме слабого сигнала устанавливался сдвиг фазы $\varphi = 0$ между напряжениями на излучателе и приемнике. Установка $\varphi = 0$ (с точностью $1,5^\circ$) проводилась подстройкой частоты (в пределах 30 Гц). Затем напряжение на излучателе скачком увеличивалось. По фигурам Лиссажу измерялось φ и рассчитывался сдвиг волнового фронта $\Delta = \lambda |\varphi| / 360^\circ$. Поскольку фронт всегда смещался в сторону излучателя (относительно исходного положения при малой мощности звука), тепловая СФЗ оказывалась сильнее конкурирующего самовоздействия за счет конвективных течений.

4. Обнаружено: после включения мощного ультразвука фронт смещается к излучателю. Смещение достигает максимума, а затем уменьшается до некоторого постоянного значения. На периферии пучка величины смещений меньше, чем у оси. В результате фронт принимает стационарную форму, наблюдается его частичное выпрямление (рис. 1).

Изменение кривизны фронта сопровождалось увеличением амплитуды волны на оси пучка. При мощности $W > 5$ Вт увеличение достигало 40%. Амплитуда росла до максимального значения и затем спадала до величины, превышавшей исходную. На краях пучка наблюдалась обратная картина — амплитуда уменьшалась; происходило сужение пучка (рис. 2). Время τ развития СФЗ (до максимального усиления амплитуды на оси) оказалось $\tau \sim W^{-1}$.

5. Результаты экспериментов качественно интерпретируются теорией СФЗ ^{3, 4}. Критическим параметром является энергия волны

$$E_{\text{кр}} = \frac{(0,61 \lambda)^2 \pi \rho c_p}{16 \alpha |c^{-1} dc / dT|},$$

где ρ , c_p — плотность, теплоемкость жидкости; c , α — скорость и коэффициент поглощения звука. Энергия, соответствующая максимальной СФЗ, в эксперименте составила 200 Дж (масло) и 800 Дж (глицерин), что существенно больше теоретических оценок (150 и 130 Дж). Различие, более существенное для глицерина, связано с сильной потерей энергии в ближнем поле. Кроме того, время развития конвекции близко ко времени достижения порога СФЗ (~ 10 с). Из-за этих факторов не удается достичь большего усиления поля на оси, а в вертикальной плоскости наблюдается "всплывание" пучка (рис. 3). (Здесь в основном проявляется тепловая конвекция, как в нелинейной оптике ⁷). Немонотонный характер поведения амплитуды и фазы волны со временем объясняется тем, что акустические и температурные конвективные течения имеют **большие** (по сравнению с СФЗ) времена установления.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что нами действительно наблюдалась самофокусировка звука.

Авторы признательны С.А.Ахманову, В.А.Красильникову, Л.А.Островскому и участникам их семинаров за полезные обсуждения результатов.

Литература

1. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. УФН, 1967, 93, 19.
2. Аскарьян Г.А. Письма в ЖЭТФ, 1966, 4, 144.
3. Заболотская Е.А., Хохлов Р.В. Акуст. ж., 1976, 22, 28.
4. Бункин Ф.В., Воляк К.И., Ляхов Г.А. ЖЭТФ, 1982, 82, 575.
5. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики М.: Наука, 1975.
6. Заболотская Е.А. Акуст. ж., 1976, 22, 222.
7. Алешкевич В.А., Сухоруков А.П. Письма в ЖЭТФ, 1970, 12, 112.

Московский
государственный университет им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
21 февраля 1985 г.