АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXV 1989 Вып. 1

УДК 534

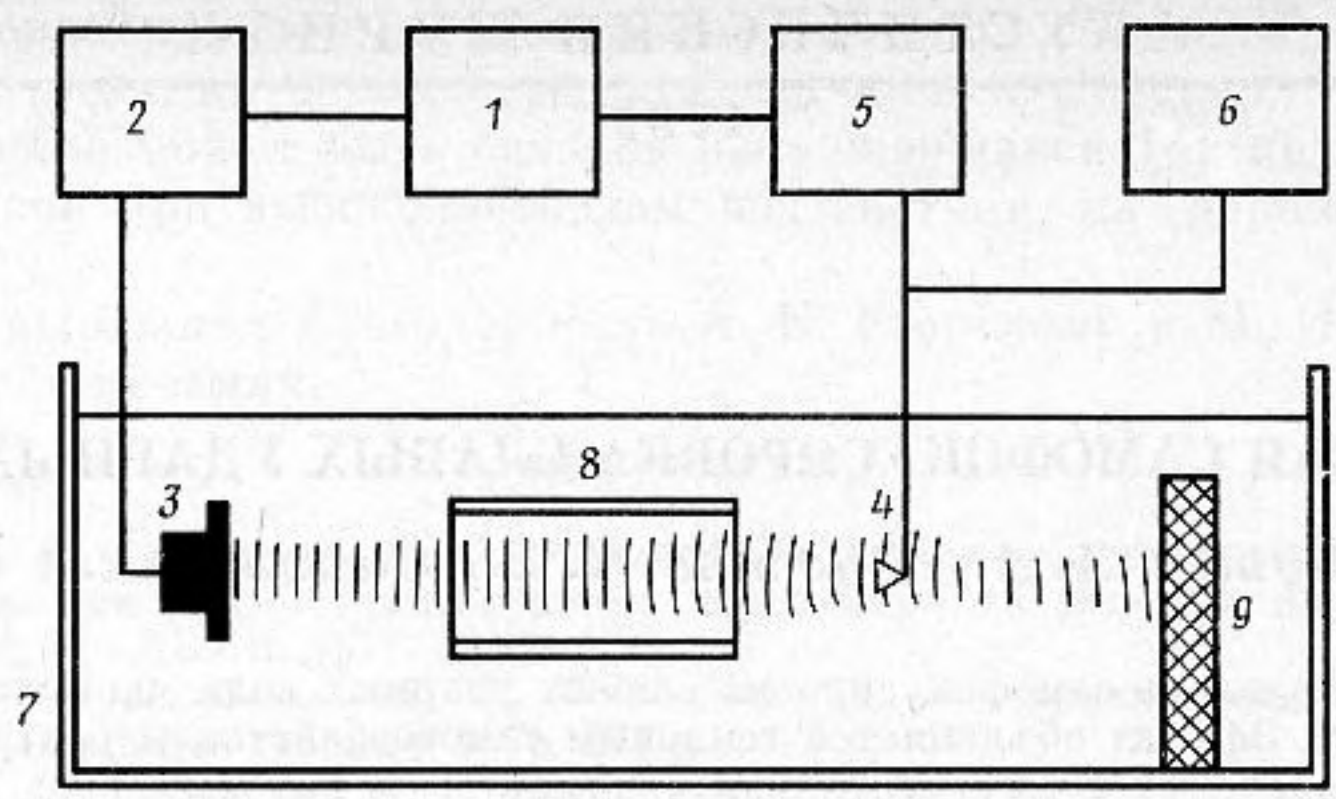
ТЕПЛОВАЯ САМОФОКУСИРОВКА СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

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

Наблюдалась самофокусировка слабых ударных волн частоты 2 МГц в ацетоне. Эффект объясняется тепловым самовоздействием ультразвука.

Одно из проявлений самовоздействия акустических волн — их самофокусировка. До недавнего времени этот эффект считался полностью аналогичным самофокусировке света [1], которая изучена очень подробно. Однако непременным условием проведения такой аналогии является требование: масштаб самофокусировки не должен превышать длину образования разрывов в профиле волны [2]. Иными словами, нелинейный кубичный эффект самовоздействия должен реализовываться на меньшем расстоянии от излучателя, чем квадратичный эффект искажения профиля и соответствующей генерации гармоник. Такой случай имеет место в вязких жидкостях при $\Gamma=(2\varepsilon\,\mathrm{Re})^{-1}>0{,}1$ (Re — акустическое число Рейнольдса, ε — параметр нелинейности). Для многих акустических экспериментов характерна обратная ситуация ($\Gamma<0{,}1$), когда из-за слабой дисперсии накапливающиеся искажения приводят к образованию разрывов в профиле волны. Поэтому интересно изучить тепловую самофокусировку (ТСФ) и в этих условиях на фоне квадратичных эффектов. Отметим, что последние не столько маскируют ТСФ, сколько усиливают ее. Действительно, при нелинейном характере поглощения звука идет более интенсивная передача энергии волны в среду, чем при линейном поглощении. Особенно сильно это проявляется при возникновении слабых ударных волн, когда происходит диссипация на образующихся разрывах.

В данном сообщении описываются эксперименты, в которых зарегистрирована ТСФ ультразвука в условиях (и за счет) образования слабых ударных волн. В качестве среды для изучения ТСФ был выбран ацетон, так как он имеет достаточно большой температурный коэффициент скорости звука ($c^{-1}(\partial c/\partial T)_p\simeq-4{,}6\cdot10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}$) и параметр акустической нелинейности ($\varepsilon\simeq5{,}4$) и в то же время малый коэффициент линейного поглощения звука ($\alpha/f^2\simeq2{,}72\cdot10^{-14}\,\mathrm{c}^2/\mathrm{м}$). Более удобна для экспериментов вода: действительно, в ней наблюдалось тепловое самовоздействие ударных волн [3]. Однако для воды $(\partial c/\partial T)_p>0$ и ТСФ не возникает; пучок, наоборот, должен дефокусироваться. Схема эксперимента изображена на фиг. 1. Напряжение частоты 2 МГц с синтезатора частот *1* подавалось на усилитель мощности *2*, а затем на излучатель *3* — вклеенную в держатель пьезопластину диаметром 30 мм. Излучаемая мощность, оцененная по нелинейному искажению профиля волны, составляла ~20 Вт. Акустический сигнал принимался гидрофоном *4*, который закреплялся на координатном столике и мог плавно перемещаться. Использовались два гидрофона: пьезокерамический цилиндр размером 2×2 мм с резонансной частотой ~2 МГц и пластина из пьезокварца *X*-среза диаметром 10 мм с резонансной частотой 14 МГц, вклеенная в оправу из оргстекла. Сигнал с гидрофона подавался на осциллограф *5* и анализатор спектра *6*. Измерения проводились в гидробассейне *7* размером 0,8×0,8×2,0 м³. Из-за технических трудностей, связанных с ограниченным количеством доступного ацетона и необходимостью его помещения в замкнутый объем, эксперимент был поставлен следующим образом. Гидробассейн заполнялся отстоявшейся водопроводной водой при комнатной температуре; в воде находились излучатель *3* и гидрофон *4*. Между ними помещалась кювета с ацетоном *8* — железная труба длиной 0,6 м, покрытая теплоизоляцион-



Фиг. 1. Схема эксперимента: *1* — синтезатор частот Ч6-31, *2* — усилитель мощности, *3* — излучатель, *4* — гидрофон, *5* — осциллограф С1-71, *6* — анализатор спектра С4-25, *7* — гидробассейн, *8* — кювета с ацетоном, *9* — поглотитель

ной лентой. Торцы трубы закрывались тонкой (~20 мкм) лавсановой пленкой, прозрачной для звука. Труба имела поперечный размер (53 мм) больший, чем диаметр проходящего через нее звукового пучка (~30 мм), так что отражение от боковых стенок было незначительно. Кювета *8* располагалась от излучателя на расстоянии 0,2 м — на этом расстоянии профиль волны был сильно искажен; в ацетон входил фактически пучок слабых ударных волн. По мере прохождения этих волн через ацетон происходило их нелинейное поглощение и тепловое самовоздействие. Выходящий из кюветы *8* звуковой пучок дальше распространялся в воде. При этом он также испытывал самовоздействие, но оно было не очень существенным, так как волна была ослаблена из-за нелинейного поглощения и дифракционного расхождения. Кроме того, самовоздействию в воде препятствовали возникающие конвективные потоки. Для уменьшения влияния реверберации на задней стенке гидробассейна помещался поглотитель из плотной резины *9*.

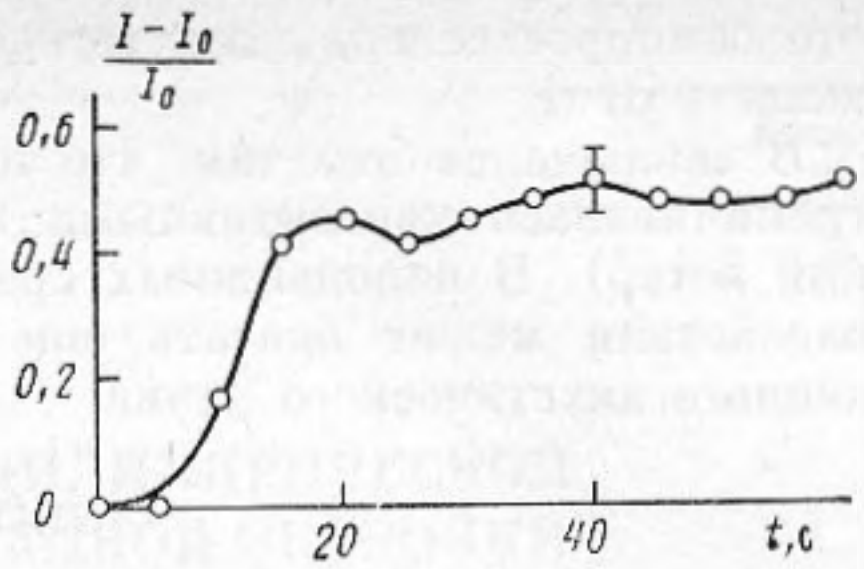
Эффект самофокусировки проявляется в изменении поперечного распределения интенсивности волны по мере ее распространения. Так как волна здесь существенно несинусоидальна, то иногда вместо интенсивности интересуются другими величинами: амплитудой гармоник, пиковым давлением и т. д. Наиболее просто измерить амплитуду первой гармоники, поскольку для этого можно использовать небольшие по размеру резонансные гидрофоны. Кроме того, в первой гармонике содержится основная часть энергии волны, поэтому ее поперечное распределение близко к поперечному распределению интенсивности. В данной работе измерялась именно амплитуда основной гармоники волны.

Резонансный 2-мм гидрофон *4* помещался на расстоянии 0,5 м от выходного торца трубы *8* (фиг. 1). В линейном режиме перемещением гидрофона поперек пучка определялось местонахождение акустической оси, где сигнал гидрофона был максимальным. В дальнейшем гидрофон передвигался в поперечном направлении так, чтобы он всегда находился на одной и той же прямой, проходящей через ось. Измерения проводились следующим образом. Устанавливалась определенная поперечная координата гидрофона. На излучатель скачком подавалось напряжение. Фиксировались показания спектранализатора *6* через каждые 5 с в течение 1 мин. На фиг. 2 приведена зависимость относительного изменения интенсивности первой гармоники на оси пучка от времени. Отчетливо наблюдался эффект самовоздействия: после включения излучателя интенсивность начинала возрастать. За 20—30 с устанавливалось стационарное значение, превосходящее начальное в 1,5 раза. Зависимости, подобные рассмотренной, измерялись не только на оси, но и при других положениях гидрофона. На фиг. 3 построен поперечный профиль интенсивности первой гармоники в различные моменты времени.

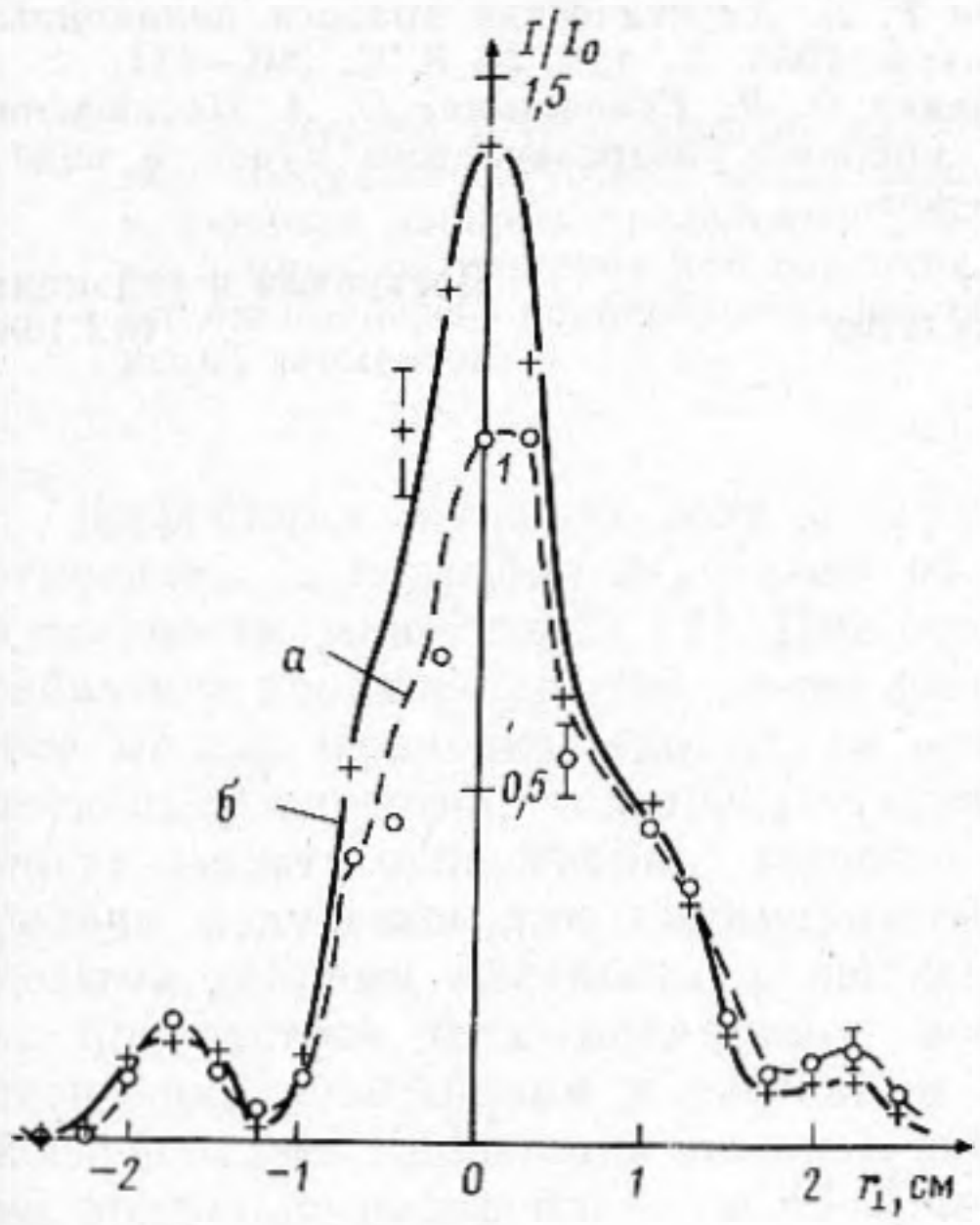
Фиг. 2. Относительное изменение интенсивности первой гармоники I на оси пучка с течением времени t. I_0 — интенсивность при $t=0$

Фиг. 3. Поперечное распределение интенсивности первой гармоники I. I_0 — интенсивность первой гармоники на оси пучка в начальный момент времени t, с; a — 0, $б$ — 15

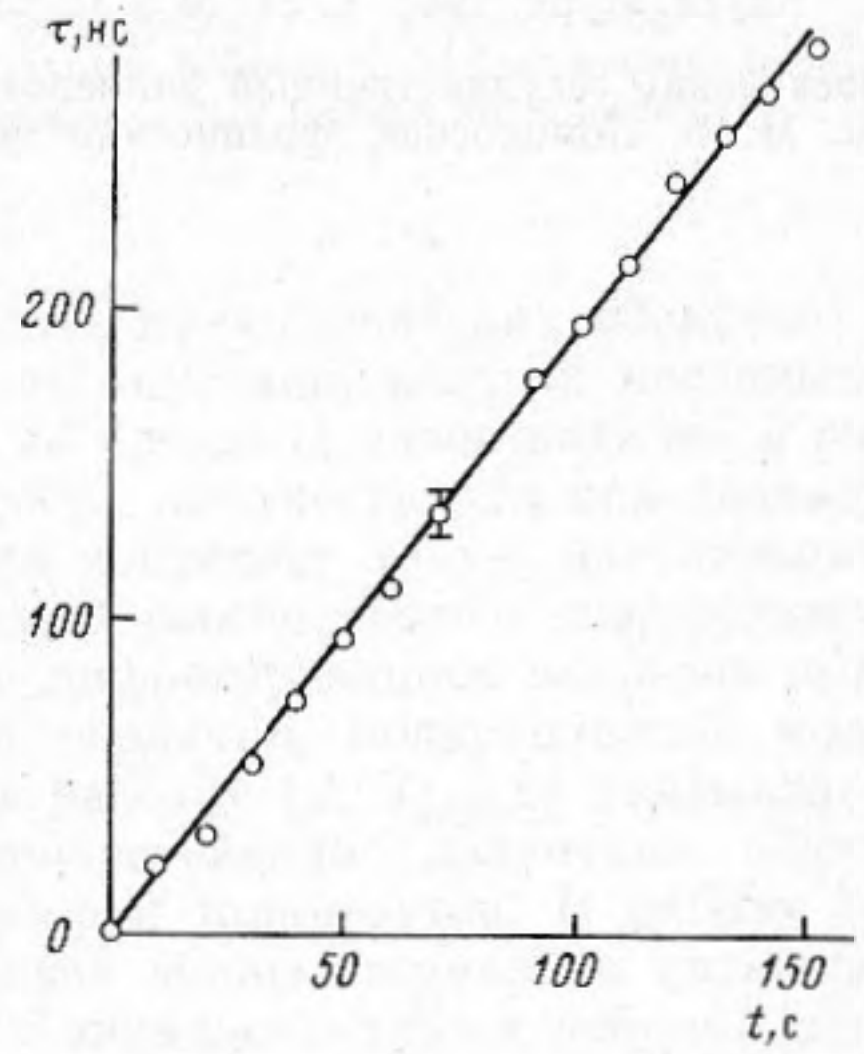
Фиг. 4. Сдвиг фронта волны τ на оси пучка с течением времени t



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

ТСФ должна сопровождаться искажением волнового фронта. Для проверки этого измерялся сдвиг профиля волны на оси пучка. Использовался широкополосный гидрофон *4* (фиг. 1), который помещался на расстоянии 3 см от выходного торца кюветы *8*. На экране осциллографа *5* наблюдался характерный для нелинейных акустических пучков искаженный профиль волны. Осциллограф был синхронизован с задающим генератором *1*. С течением времени изображение профиля волны смещалось вправо. Это согласуется с тепловым механизмом самовоздействия в ацетоне (смещение боковых стенок кюветы *8* под действием радиационного давления звука, как показывает расчет, пренебрежимо мало). На фиг. 4 приведена измеренная зависимость сдвига фронта волны от времени. Наклон прямой определяется выделявшейся в кювете мощностью P. Оценки дают $P\sim3$ Вт, соответствующая скорость роста температуры $\partial T/\partial t\sim10^{-3}$ К/с.

Наряду с самофокусировкой существенную роль может играть другой механизм теплового самовоздействия — самопросветление [2], связанное с зависимостью коэффициента линейного поглощения среды α от температуры. Оценим роль самопросветления в описанном эксперименте. Для первой гармоники волны в ацетоне имеем $\alpha\simeq0{,}1$ м$^{-1}$. В воде, где звук распространялся до и после прохождения через ацетон, самовоздействием можно было пренебречь — это показали измерения в отсутствии трубы с ацетоном. При длине трубы $l=0{,}6$ м $\exp(2\alpha l)\simeq1{,}12$, т. е. даже если бы среда полностью «просветлилась», интенсивность возросла бы лишь на 12%, а не на 50%, как было в эксперименте (фиг. 2). Таким образом, самопросветление не оказывало существенного влияния, и наблюдаемый эффект был вызван именно самофокусировкой. Это — важная особенность самовоздействия в слабопоглощающих средах. При $\alpha l\to0$ эффект тепло-

всего самопросветления отсутствует вовсе, так как поглощение перестает зависеть от α.

В заключение отметим, что наблюдавшаяся ТСФ пилообразных волн ограничивалась конвективными потоками (термоконвекция и акустический ветер). В неподвижных средах указанный эффект теплового самовоздействия может оказать еще большее влияние на распространение мощного акустического пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В.* Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде // Успехи физ. наук. 1967. Т. 3. № 1. С. 19—70.
2. *Бункин Ф. В., Кравцов Ю. А., Ляхов Г. А.* Акустические аналоги нелинейных оптических явлений // Успехи физ. наук. 1986. Т. 149. № 3. С. 391—411.
3. *Андреев В. Г., Карабутов А. А., Руденко О. В., Сапожников О. А.* Наблюдение эффекта теплового самовоздействия мощного ультразвукового пучка в воде // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 457—458.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, физический факультет

Поступила в редакцию
10.I.1988