

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.22

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА ТЕПЛОвого САМОВОЗДЕЙСТВИЯ  
МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА В ВОДЕ

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

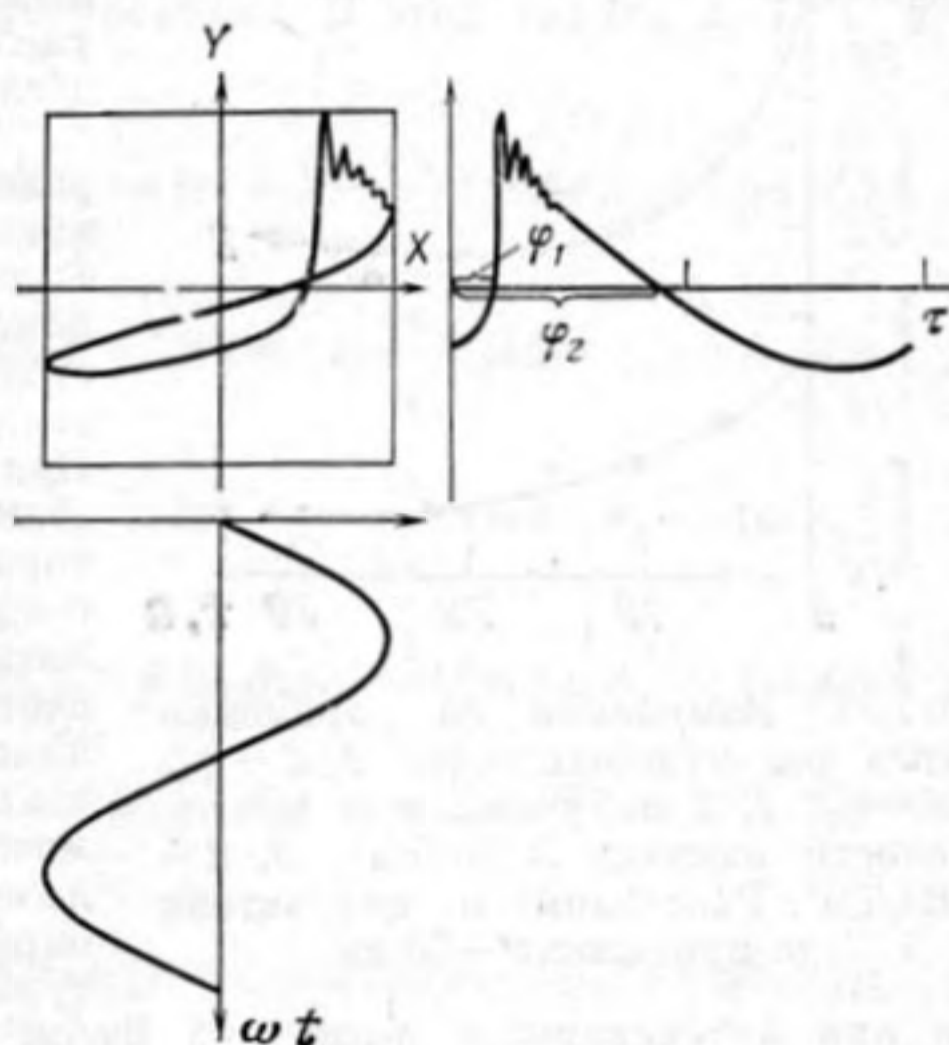
Эффекты самовоздействия световых пучков в нелинейных средах широко известны. В то же время возможность самовоздействия акустических пучков лишь теоретически рассматривалась в литературе (см. работы [1-3] и имеющиеся в них ссылки). В настоящей работе предпринята попытка экспериментального наблюдения эффекта теплового самовоздействия мощного ультразвукового пучка в воде.

В акустике в отсутствие дисперсии самовоздействие проявляется на фоне сильных квадратичных эффектов (образования ударных фронтов, нелинейного затухания), которые дают, как правило, существенно больший вклад в изменение амплитуды волны, нежели кубические эффекты, ответственные за самовоздействие. Поэтому самовоздействие проявляется в основном в изменении фазы волны.

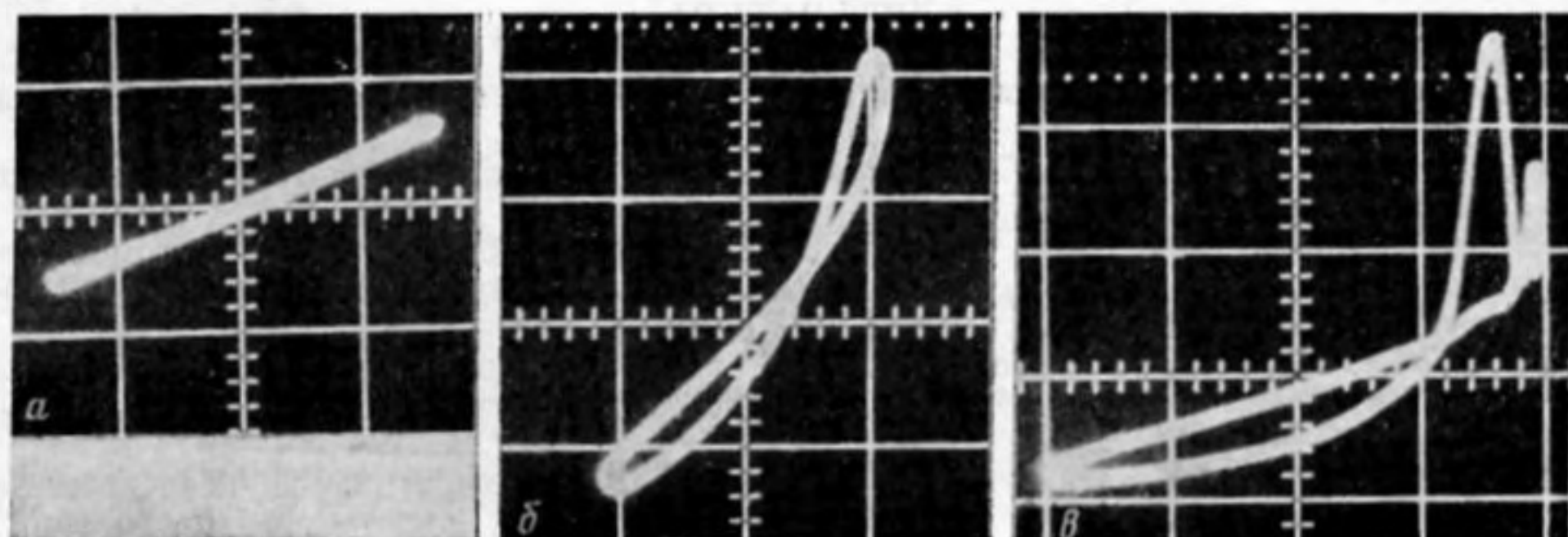
В экспериментах сдвиг фазы волны в звуковом пучке конечной амплитуды определялся по методу фигур Лиссажу. Фактически измерялся сдвиг фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  нулевых точек профиля волны (см. фиг. 1), в отличие от методики работы [4], где измерялся сдвиг фазы лишь первой гармоники волны.

Эксперименты проводились в гидробассейне, заполненном отстоявшейся водопроводной водой, на различных расстояниях от излучателя и при различных условиях накачки в диапазоне интенсивностей  $0,1 \div 5$  Вт/см<sup>2</sup> на частоте ультразвука  $\sim 1$  МГц. Гармонический сигнал с синтезатора частот типа Ч6-31 поступал на усилитель мощности и затем на пьезокерамический излучатель, возбуждавший ультразвуковые волны в воде. Сигнал с задающего генератора использовался также для развертки луча по оси X на осциллографе типа С1-71, на вход Y которого поступал сигнал от широкополосного гидрофона, помещенного в звуковой пучок.

При слабой накачке (когда сигнал гидрофона был гармоническим) устанавливался нулевой сдвиг фаз между напряжением на излучателе и приемнике (фиг. 2, а),



Фиг. 1. Фигура Лиссажу для случая звукового пучка конечной амплитуды. По оси X — напряжение на излучателе. Сдвиг фаз при слабом сигнале — нулевой,  $\tau = \omega(t - x/c_0)$

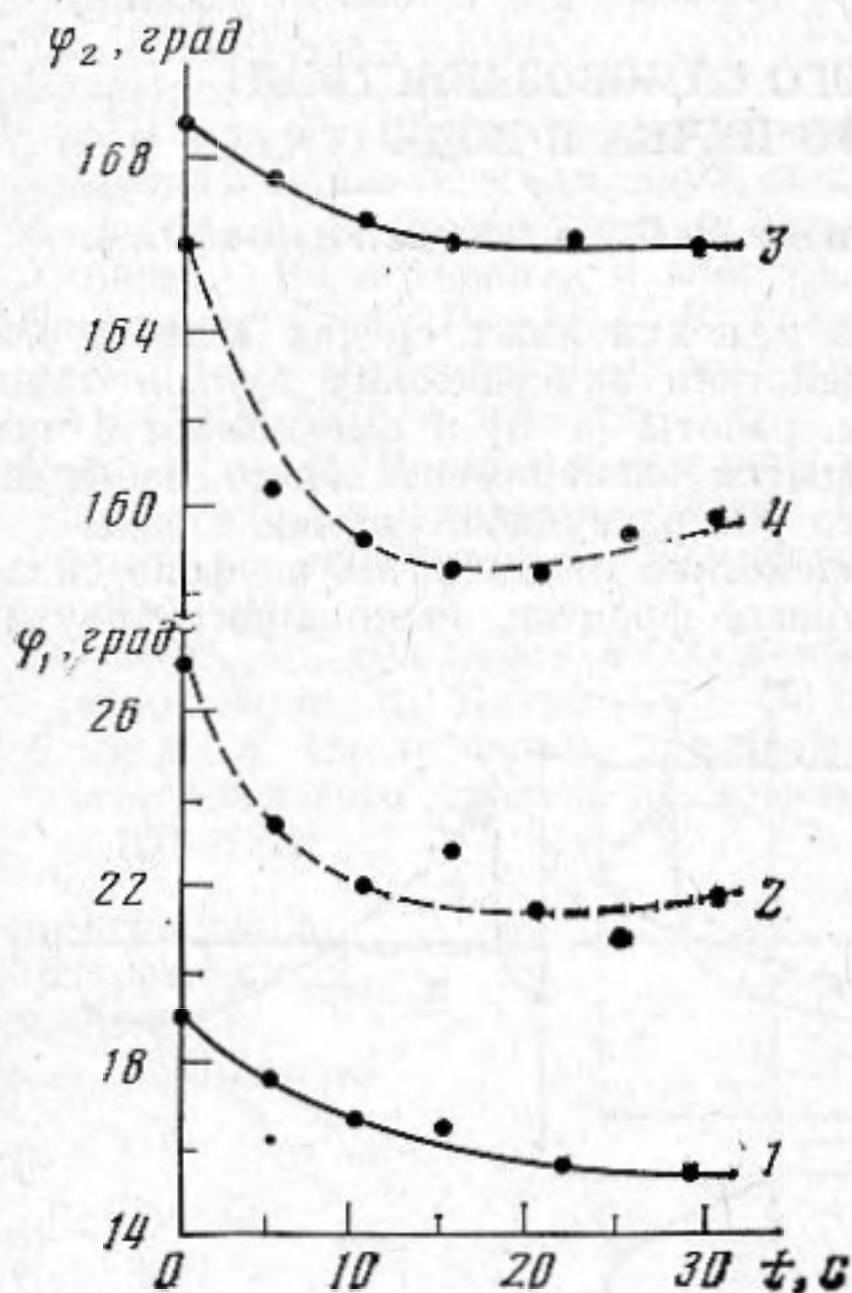


Фиг. 2. Фигуры Лиссажу при различных уровнях накачки. а —  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>, б — 1,6 Вт/см<sup>2</sup>, в — 5,0 Вт/см<sup>2</sup>



точность установки составляла  $\pm 1,5^\circ$ . Расстояние и частота фиксировались. С увеличением напряжения на излучателе (уровень высших гармоник не превышал  $-30$  дБ) происходило нелинейное искажение сигнала гидрофона, при этом фигура Лиссажу приобретала вид, характерный для сложения сигналов с частотами  $\omega$  и  $2\omega$  (фиг. 2, б). При дальнейшем увеличении накачки в профиле волны образовывался ударный фронт, а фигура Лиссажу приобретала вид, приведенный на фиг. 2, в.

В ходе измерения сдвигов фаз нулевых точек  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  было замечено, что фигуры Лиссажу не являются стационарными. Это наблюдалось только в том случае



Фиг. 3. Изменение со временем сдвига фаз нулевых точек. 1, 2 —  $\varphi_1$ , 3, 4 —  $\varphi_2$ ; 1, 3 получены при интенсивности накачки  $3 \text{ Вт/см}^2$ , 2, 4 —  $5 \text{ Вт/см}^2$ . Расстояние от излучателя до приемника —  $50 \text{ см}$

когда ударный фронт формировался между излучателем и приемником, что приводило к эффективной нелинейной диссипации энергии волны. Было отмечено следующее: после включения излучателя величины  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  уменьшались, причем через некоторое время картина стабилизировалась (см. фиг. 3). Скорость изменения фаз увеличивалась с увеличением интенсивности волны. После обратного переключения излучателя в режим слабого сигнала сдвиг фаз линейного сигнала уже не был нулевым (как первоначально установленный); он медленно стремился к нулю с течением времени. Этот дополнительный сдвиг фаз мог быть скомпенсирован увеличением частоты сигнала на несколько десятков герц.

Приведенные данные можно интерпретировать в рамках механизма теплового самовоздействия мощного ультразвукового пучка. В самом деле, при слабой накачке (когда длина образования разрыва превышает расстояние до гидрофона) нагрев среды мал ввиду малости линейного поглощения волны. При больших накачках становится существенным нелинейное поглощение волны, которое приводит к эффективному нагреву среды и изменению скорости звука. Стабилизация температурного поля происходит за счет диффузии тепла поперек пучка. По измерениям зависимости интенсивности волны от расстояния до излучателя (см. [5]) может быть определена мощность тепловыделения в звуковом пучке. По этим данным определялась скорость изменения температуры в момент включения излучателя, которая при интенсивности волны  $\sim 4 \text{ Вт/см}^2$  составляла  $7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{К/с}$ . Это приводило к дрейфу фазы волны со скоростью порядка  $0,3 \text{ град/с}$ , что совпадает с измеренным значением. Знак изменения фазы также соответствует тепловому механизму самовоздействия, так как в воде температурный коэффициент скорости звука положителен.

Другие механизмы также могут приводить к сдвигу фаз в мощном ультразвуковом пучке (например, рассеяние на акустических течениях). Однако для проведенных экспериментов вклад этих механизмов в измеренные значения сдвига фаз мал (измеренная скорость акустических течений не превышала  $2 \text{ см/с}$ ). Поэтому можно утверждать, что наблюдалось именно тепловое самовоздействие акустической волны.

Авторы выражают благодарность Алейникову В. Л. за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аскаръян Г. А. Самофокусировка и фокусировка ультра- и гиперзвука. — Письма в ЖЭТФ, 1966, т. 4, № 4, 144—147.
2. Бахвалов Н. С., Жилейкин Я. М., Заболотская Е. А. Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 176 с.
3. Бункин Ф. В., Воляк К. И., Ляхов Г. А. Эффекты самовоздействия и вынужденного рассеяния звуковых пучков в поглощающих жидкостях — тепловая самофокусировка. — ЖЭТФ, 1982, т. 83, № 2, 575—584.
4. Зарембо Л. К., Шкловская-Корди В. В. К вопросу о скорости распространения ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях. — Акуст. журн., 1960, т. 6, № 1, 47—51.
5. Андреев В. Г., Карабутов А. А., Руденко О. В. Экспериментальное исследование звуковых пучков конечной амплитуды. — Вест. Моск. ун-та Сер. Физ.-астрон., т. 25, № 3, с. 35—38.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Поступило в редакцию 27.XI.1984