УДК 534.222.2

В. А. Буров
В. А. Красильников
Е. Я. Тагунов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛИНЕАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛАБОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА С ИНТЕНСИВНЫМИ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ В ВОДЕ

В ряде работ, посвященных изучению взаимодействия ультразвуковых сигналов с мощными низкочастотными возмущениями, были получены теоретические результаты, указывающие на возможность проявления при таких взаимодействиях ярко выраженных нелинейных эффектов, таких, как сильное дополнительное затухание сигнала [1—3], возникновение пространственных осцилляций амплитуды сигнала (см. статью на с. 99), существенные изменения в спектральном составе сигнала [2]. Целью данной работы являлось экспериментальное изучение упомянутых выше эффектов и сопоставление экспериментальных данных с теоретическими расчетами (см. в [2] и также статью на с. 99).

В проведенных нами экспериментах частота f_1 исследуемого сигнала могла изменяться от 8,7 до 14,2 МГц, а его интенсивность J_1 от 10^{-6} до 10^{-4} Вт/см^2, что соответствует значениям колебательной скорости $A_1 = (10^{-2} \div 10^{-1})$ см/с.

В качестве низкочастотного возмущения в одних экспериментах была использована интенсивная монохроматическая волна с частотой $f_2 = 1 \div 1{,}35$ МГц, в других — мощный низкочастотный шум, спектр которого был сосредоточен в частотном диапазоне от 600 КГц до 1,9 МГц, а интенсивность $J = 0{,}3$ Вт/см^2, что соответствует среднеквадратичному значению колебательной скорости $\sigma = 4{,}6$ см/с.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В кювете с водой (*1*) размещался низкочастотный пьезокерамический излучатель (*2*) и высокочастотный излучатель (*3*), представляющий собой пластинку кварца *x*-среза. Преобразователь (*2*) в одних экспериментах возбуждался с помощью низкочастотного генератора синусоидальных сигналов (*5а*), в других — с помощью мощного генератора шума (*5б*). Преобразователь (*3*) возбуждался с помощью высокочастотного генератора синусоидальных сигналов (*7*). Все измерения проводились в импульсном режиме. Модулятор (*6*) с регулируемой временной задержкой обеспечивал задержку высокочастотного импульса на время, необходимое для прохождения низкочастотным акустическим сигналом пути от преобразователя (*2*) до преобразователя (*3*).

Различные частотные компоненты спектра принятого сигнала изучались с помощью спектр-анализатора (*9*), на который подавался сигнал, принятый плоским кварцевым преобразователем (*4*). Для выделения акустического сигнала из серии принятых импульсов было применено стробирующее устройство (*8*).

Подвижное крепление преобразователей обеспечивало возможность тщательной юстировки системы с целью строгого совмещения осей излучаемых ультразвуковых пучков и расположения плоскости приемного преобразователя строго параллельно фронту падающей волны. Каретка специальной конструкции позволяла осуществлять плоскопараллельное перемещение приемного преобразователя вдоль направ-

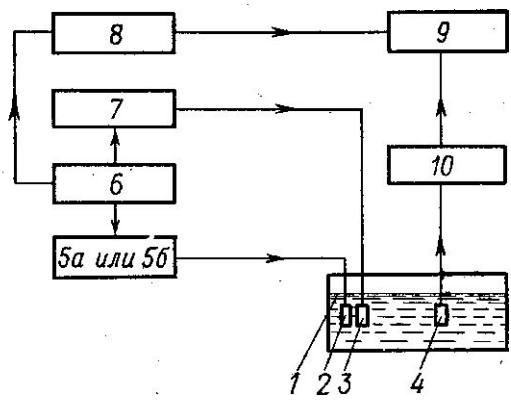

Рис. 1

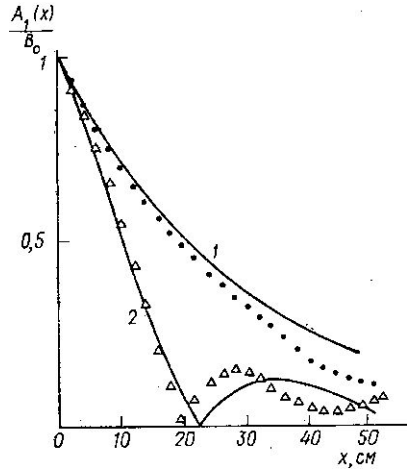

Рис. 2

ления распространения ультразвуковых волн. Акустическая «ловушка», установленная в конце кюветы, исключала появление сигналов, отраженных от стенок кюветы. С целью предотвращения перегрузки входных усилительных каскадов мощным низкочастотным сигналом, а также для повышения чувствительности приемной аппаратуры были использованы электрические фильтры (*10*).

Особое внимание обращалось на исключение возможного влияния на результаты эксперимента нелинейных искажений в аппаратуре. Подтверждением акустической природы зафиксированных нелинейных эффектов может, в частности, служить их накопление несмотря на уменьшение амплитуды взаимодействующих волн с расстоянием. Абсолютная калибровка приемного тракта осуществлялась калориметрическим методом. Более точная относительная калибровка проводилась с помощью широкополосного излучателя, имеющего равномерную амплитудно-частотную характеристику на рабочих частотах.

Погрешность в измерении амплитуды мощного низкочастотного сигнала составляла 6%; абсолютное значение амплитуды слабого высокочастотного сигнала измерялось с погрешностью 50%. Погрешность в измерении амплитуд комбинационных тонов относительно амплитуды высокочастотного сигнала не превышала 8%. Относительные изменения амплитуд высокочастотных компонентов измерялись с погрешностью 5—10%. Следует отметить, что малая точность в определении абсолютного значения амплитуды высокочастотного сигнала была несущественна, так как в нашем случае, как показали теоретические расчеты, (см. также ст. на с. 99) и эксперимент, амплитуды комбинационных тонов были прямо пропорциональны начальной амплитуде высокочастотной волны $B_0 \equiv A_1(0)$. Поэтому, если при построении графиков за-

висимости от расстояния амплитуды $A(x)$ высокочастотных компонентов по оси ординат откладывать величину $\frac{A(x)}{B_0}$, то необходимо обеспечить высокую точность фиксации лишь относительных изменений величины интересующих нас амплитуд.

Сопоставление данных некоторых из проведенных экспериментов с результатами численных расчетов, основанных на решении уравнения

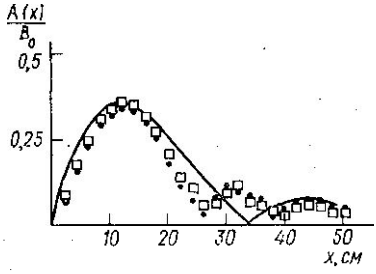

Рис. 3

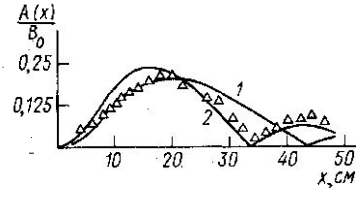

Рис. 4

Бюргерса по методике, описанной в ст. на с. 99, представлено на рис. 2—4. На рис. 2 изображены графики изменения с расстоянием амплитуды волны 12 МГц с начальным значением колебательной скорости $B_0=8\cdot10^{-2}$ см/с в случае ее взаимодействия с мощной волной 1 МГц, амплитуда колебательной скорости которой $A_0=8$ см/с. Кривая *1* соответствует затуханию волны 12 МГц в отсутствие мощной волны 1 МГц, кривая *2* — при ее наличии (непрерывные линии — теория, соответствующие точки — эксперимент). На рис. 3 представлены графики изменения с расстоянием амплитуды волны суммарной частоты 13 МГц для того же значения амплитуды волны 1 МГц и двух значений начальной амплитуды волны 12 МГц (кружочки — $B_0=4\cdot10^{-2}$ и $B_0=8\cdot10^{-2}$ см/с).

При сопоставлении экспериментальных и теоретических данных следует иметь в виду, что преобразователь (*3*) по условиям эксперимента располагался на пути распространения мощной волны f_2 и вносил некоторые искажения в поле этой волны. Это, в частности, выражалось в том, что амплитуда волны f_2 непосредственно за преобразователем (*3*) за счет дифракции на преобразователе была ослаблена. Поэтому в приведенных выше теоретических расчетах в качестве амплитуды низкочастотной волны f_2 нами было использовано ее усредненное по экспериментальным данным значение $\widetilde{A}_2=\frac{\int_0^{x_{max}} A_2(x)\,dx}{x_{max}}$.

Некоторая некорректность в сопоставлении теории и эксперимента заключается также и в том, что за начало участка взаимодействия нами принималась точка расположения преобразователя (*3*), в то время как волна f_2 достигала этой точки, уже претерпев определенные нелинейные искажения. Именно этими особенностями можно объяснить, что измеренные на конце участка взаимодействия амплитуды комбинационных тонов согласуются с теми теоретическими значениями, которые соответствуют несколько большим величинам амплитуды A_0 мощной волны. Это, в частности, хорошо видно на рис. 4, где приведены

теоретические кривые зависимости от расстояния амплитуды волны $f=f_1+2f_2$ (14 МГц) для $A_0=8$ см/с (*1*) и $A_0=10$ см/с (*2*), полученные путем численного решения уравнения по методу, описанному в ст. на с. 99, экспериментальные данные, соответствующие усредненному значению $\widetilde{A}_2$, равному 8 см/с.

Несмотря на достаточно хорошее совпадение данных эксперимента с численными расчетами, следует иметь в виду, что наибольший практический интерес представляет возможность применения аналитических результатов для определения наиболее характерных параметров взаимодействия (таких, например, как величины дополнительного затухания сигнала или положение минимумов амплитуд волн основной частоты и волн комбинационных тонов).

Как было показано в работе [4], решение, полученное в четырехчастотном приближении, дает картину, качественно очень мало отличающуюся от результатов численных расчетов, а в некоторых случаях хорошо совпадающую с ними и количественно. Последнее относится, например, к поведению амплитуды высокочастотного сигнала на расстояниях до первого минимума, а также к определению координаты этого минимума. Можно показать, что в случае, когда амплитуда мощной низкочастотной волны A_2 не остается постоянной на всем участке взаимодействия (в частности, в наших экспериментах это было обусловлено дифракцией низкочастотной волны на высокочастотном преобразователе (*3*)), теоретические расчеты, проведенные в рамках приближений четырехчастотного взаимодействия и заданного поля, приводят к следующей зависимости от расстояния амплитуды высокочастотной волны $A(x)$. Здесь мы пренебрегаем величинами порядка выше первого по f_2/f_1 и $1/\varepsilon Re_2$, где ε — нелинейный параметр, Re — число Рейнольдса для волны

$$A_1(x) = B_0 e^{-\delta x} \cos \beta(x),$$

$$\beta(x) = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\varepsilon}{c_0^2} \omega_1 \int_0^x A_2(\xi)\, d\xi, \tag{1}$$

где

$\omega_1=2\pi f_1$; $\delta = \dfrac{b\omega_1^2}{2\rho_0 c_0^3}$ — коэффициент затухания волны f_1.

При этом ожидать, что теория будет адекватно описывать изучаемые нелинейные эффекты, можно только в том случае, если в теоретических расчетах будут использованы экспериментально измеренные значения коэффициента естественного затухания δ. Измеренное естественное затухание высокочастотной волны малой амплитуды оказывается, как правило, несколько больше, чем предсказывает теория. Достаточно простые аналитические результаты, полученные в четырехчастотном приближении, весьма удобны для теоретических оценок. Для координаты первого минимума X_1 амплитуды высокочастотного сигнала получаем, в частности, из (1):

$$X_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\pi c_0^2}{\varepsilon \omega_1 \widetilde{A}_2}. \tag{2}$$

Для воды получаем $X_1 \simeq \dfrac{2 \cdot 10^9}{f_1 \widetilde{A}_2}$ [см].

На рис. 5 приведены теоретические и экспериментальные данные для координаты первого минимума амплитуды слабого ультразвуково-

го сигнала на частотах f_1; □ — 8,7; ● — 11,5; △ — 12,5 и 14,2 МГц при взаимодействии его с мощной ультразвуковой волной на частоте 1,35 МГц в зависимости от величины $\frac{1}{f_1\tilde{A}_2}$ (во всех экспериментах амплитуда колебательной скорости низкочастотной волны была в пределах от 5 до 18 см/с).

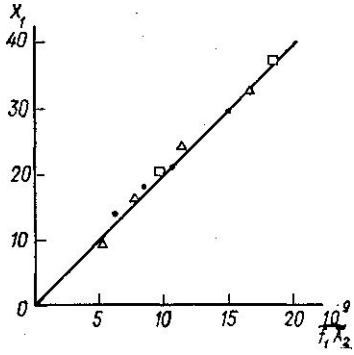

Рис. 5

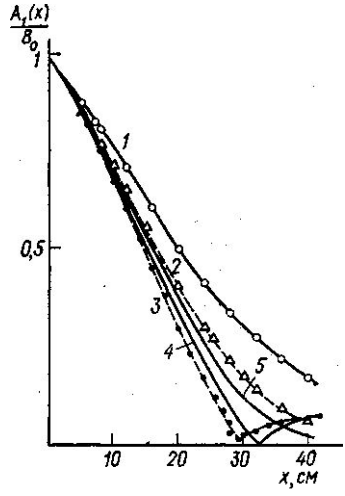

Рис. 6

Большой интерес представляет сравнение процесса нелинейного взаимодействия двух монохроматических волн и процесса, в котором вместо мощной низкочастотной волны используется шум. На рис. 6 кривая *1* представляет собой экспериментальную зависимость от расстояния амплитуды волны $f_1=11{,}5$ МГц ($B_0=8\cdot10^{-2}$ см/с) в отсутствие взаимодействия. Кривая *2* дает наблюдаемую в эксперименте зависимость от расстояния амплитуды этой же волны в случае ее коллинеарного взаимодействия с шумом, спектр которого сосредоточен в частотном диапазоне 0,6÷1,9 МГц, а интенсивность равна 0,3 Вт/см², что соответствует среднеквадратичному значению колебательной скорости $\sigma=4{,}6$ см/с. На кривой *3* отложены полученные экспериментально значения амплитуды волны f_1 при ее взаимодействии с низкочастотной монохроматической волной частоты $f_2=1{,}35$ МГц и той же интенсивности, что и шум в предыдущем случае (этому значению интенсивности соответствует амплитуда колебательной скорости $A_2=6{,}5$ см/с). На кривой *4* представлены теоретические данные для амплитуды волны f_1, полученные по формуле (1). При построении всех теоретических кривых, и в частности кривой *4*, было взято экспериментально измеренное значение коэффициента естественного затухания δ, несколько большее, чем теоретическое.

При расчете дополнительного затухания, испытываемого высокочастотным сигналом при взаимодействии его с шумом, нами были использованы результаты, приведенные в работе [2]. Обобщив эти результаты на случай, когда интенсивность шума не остается постоянной на участке взаимодействия, можно получить следующую формулу, описывающую динамику изменения амплитуды сигнала:

$$A_1(x) = B_0 e^{-\delta x} \alpha(x), \tag{3}$$

где

$$\alpha(x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\varepsilon}{c_0^2}\,\omega_1 \int_0^x \sigma(\xi)\,d\xi\right]^2\right\}.$$

Теоретические данные, соответствующие формуле (3), приведены на кривой 5. При расчете величины множителя $\alpha(x)$ были использованы экспериментально измеренные для различных значений x среднеквадратичные значения колебательной скорости $\sigma(x)$ шума.

Подводя итог, можно сказать, что проведенные эксперименты подтверждают выводы, содержащиеся в работе [4], которые следуют из анализа взаимодействия, основанного на решении уравнения Бюргерса. Показано, в частности, что амплитуда слабого высокочастотного сигнала и амплитуды волн комбинационных частот при осцилляциях, возникающих вследствие нелинейного взаимодействия с мощным низкочастотным регулярным сигналом, могут спадать до величины, близкой к нулю; дополнительное затухание высокочастотного сигнала может при этом превышать 30÷40 дБ.

Закономерности в изменении с расстоянием амплитуд волн комбинационных частот, выявленные в [4], хорошо прослеживаются на достаточно больших участках взаимодействия $\left(\text{при } x < x_{\text{разр}} = \dfrac{c_0^2}{\varepsilon A_0 \omega_2}\right)$. При этом для оценки основных параметров, характеризующих процесс взаимодействия (например, скорость нарастания, координаты максимумов и минимумов, периоды пространственных осцилляций амплитуд волн суммарной и разностной частот, дополнительное затухание высокочастотной волны основной частоты), могут быть использованы аналитические результаты 4-частотного приближения, удовлетворительно совпадающие с результатами численных расчетов и данными эксперимента.

Полученные экспериментальные данные показывают также, что величина дополнительного затухания, испытываемого слабым высокочастотным сигналом вследствие нелинейного взаимодействия его с мощным низкочастотным шумом, несколько ниже, чем в случае взаимодействия сигнала с монохроматической волной такой же интенсивности, что и шум. При достаточно большой ширине спектральной полосы, в которой заключен шум (например, от 600 кГц до 1,9 МГц), осцилляции амплитуды высокочастотного сигнала не наблюдаются. Следует также отметить, что теория, развитая в работе [2], дает результаты, качественно хорошо описывающие изменение величины дополнительного затухания высокочастотного сигнала с расстоянием вследствие нелинейного взаимодействия его с шумом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников В. А., Руденко О. В., Чиркин А. С. «Акустический журнал», 1975, 21, 124—126.
2. Руденко О. В., Чиркин А. С. ЖЭТФ, 1974, 67, 1903—1911.
3. Павлов В. И. «Акустический журнал», 1976, 22, 580—585.

МГУ. Кафедра акустики