

## ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

В работах [1, 2] анализируется динамика гармонических и субгармонических составляющих спектра сигнала кавитационного шума при увеличении напряжения, подводимого к цилиндрическому фокусирующему излучателю. Показано, что рост амплитуды субгармонических составляющих спектра происходит пороговым образом. Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании не только амплитудных значений, но и фазовых соотношений между гармоническими составляющими сигнала на различных стадиях кавитационного процесса.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. С генератора 1 непрерывный гармонический сигнал со ступенчато увеличивающимся напряжением подавался на усилитель 2. Напряжение усиленного сигнала измерялось вольтметром 3, а спектр сигнала контролировался с помощью спектроанализатора 4 в режиме реального времени. Сигнал с усилителя возбуждал цилиндрический фокусирующий излучатель 5, помещенный в исследуемую жидкость 6. Принятый гидрофоном 7 сигнал кавитационного шума подавался на полосовые пропускающие фильтры, настроенные на частоту излучения  $f$  — 9 и первую гармонику  $2 \times f$  — 10. Величина сигнала частоты  $f$  измерялась вольтметром 8 и с учетом чувствительности гидрофона пересчитывалась в величину давления в кавитационной области —  $p_f$ . Разность фаз  $\Delta\phi$  между сигналом излучения и первой гармоникой, измерялась фазометром 11. Спектр принятого гидрофоном сигнала измерялся в реальном масштабе времени спектроанализатором 4.

Дискретность изменения напряжения на излучателе  $\Delta U$  составляла 10 В. Время измерений амплитуды акустического сигнала и разности фаз между сигналом излучения и первой гармоникой при фиксированном напряжении на излучателе составляло 15 с. В течение этого времени наблюдалась стабильность измеряемых величин вплоть до напряжений, соответствующих порогу кавитации  $U_k$ .

Отметим также, что так как при измерении разности фаз частоты сигналов являются кратными и на периоде сигнала излучения укладываются два периода сигнала первой гармоники, то измерялась разность фаз между первым пересечением сигналами нулевой линии при одинаковом наклоне обоих сигналов.

Измерения были выполнены вблизи поверхности моря, покрытой ледяной шугой, на глубинах  $h_1=0,5$  и  $h_2=2,0$  м для частот излучения  $f_1=800$  и  $f_2=2300$  Гц. Результаты измерений приведены на рис. 2–4. Представленные зависимости позволяют проследить стадии акустической кавитации при увеличении подводимой к кавитационной области энергии.

Для линейного участка зависимостей  $p_f$  от  $U$  ( $U < 100$  В,  $h=2$  м;  $U < 70$  В,  $h=0,5$  м, рис. 2) коэффициент нелинейных искажений  $k$  ( $k = (p_n/p_f) \cdot 100\%$ ,  $p_n$  — давление шумов кавитации) не превышает 4% для обеих частот и положений излучателя (рис. 3). Разность фаз  $\Delta\phi$  сохраняется постоянной для обеих частот при положении излучателя на глубине  $h=2$  м и для частоты  $f=800$  Гц — при положении излучателя вблизи поверхности ( $h=0,5$  м). Для частоты  $f=2300$  Гц имеется максимум величины  $\Delta\phi$  при  $U=60$  В и положении излучателя вблизи поверхности,  $h=0,5$  м (рис. 4). С увеличением напряжения на излучателе характер зависимостей  $p_f$ ,  $k$  и  $\Delta\phi$  различен для положения излучателя на глубинах  $h=0,5$  и 2 м.

На глубине  $h=2$  м процесс нарастания гармонических составляющих в спектре сигнала более плавный. Происходит стабилизация кавитационных явлений, что сле-

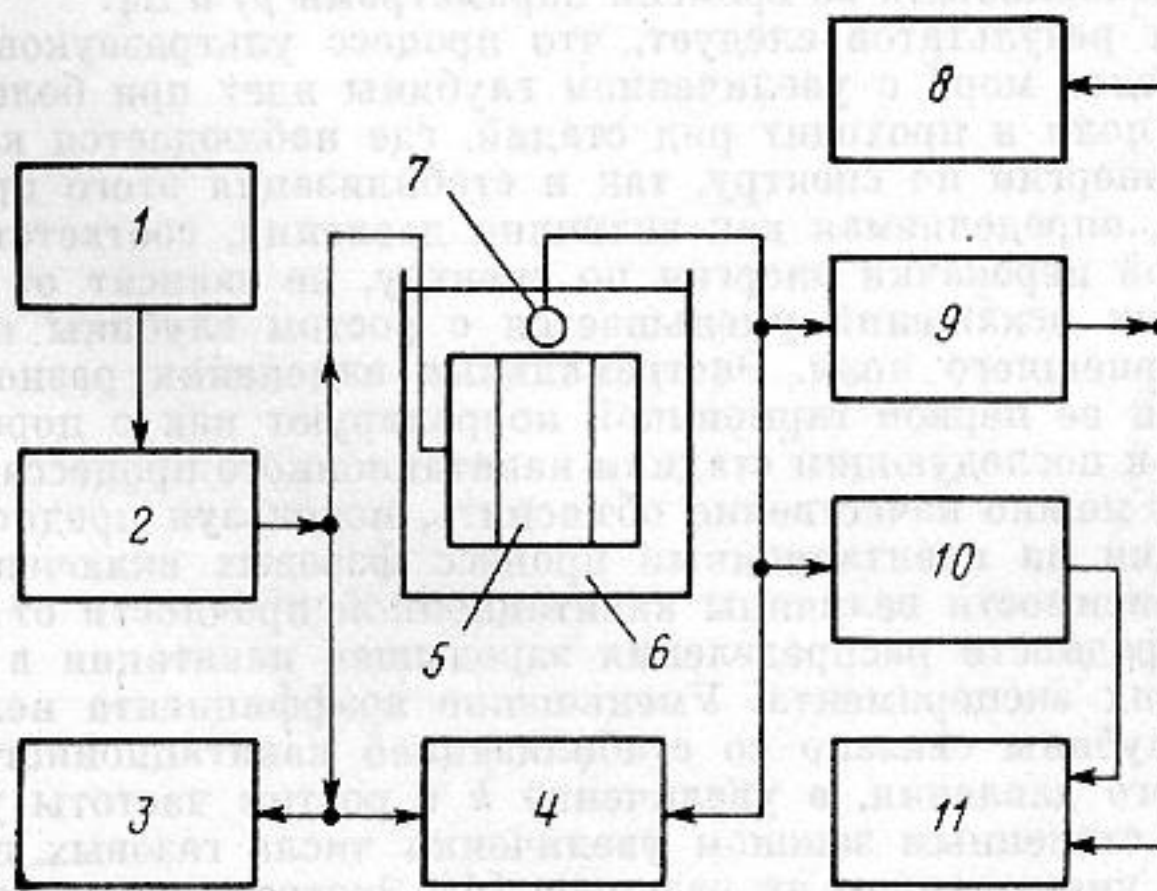


Рис. 1. Блок-схема кавитационных измерений



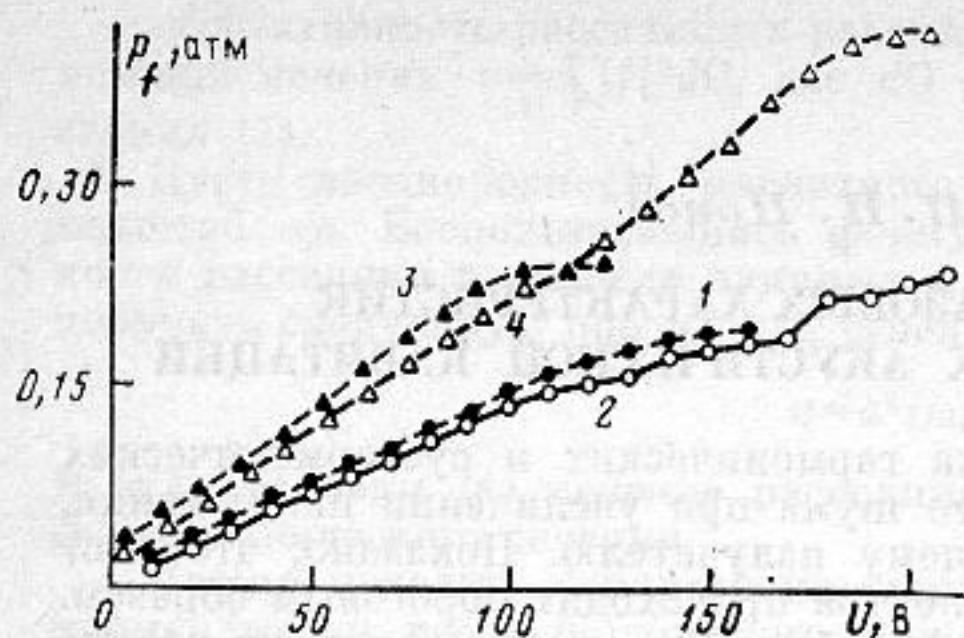


Рис. 2

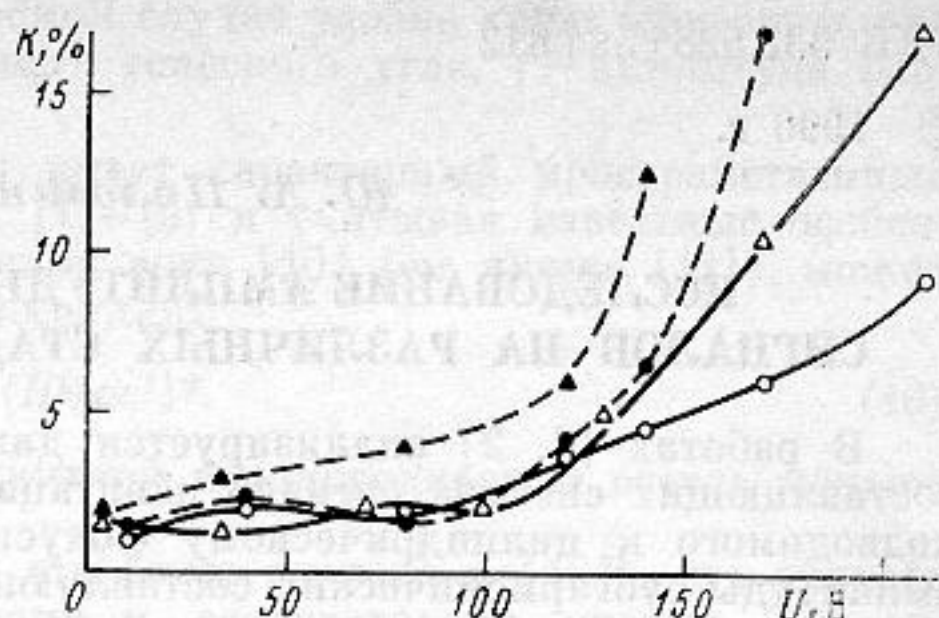


Рис. 3

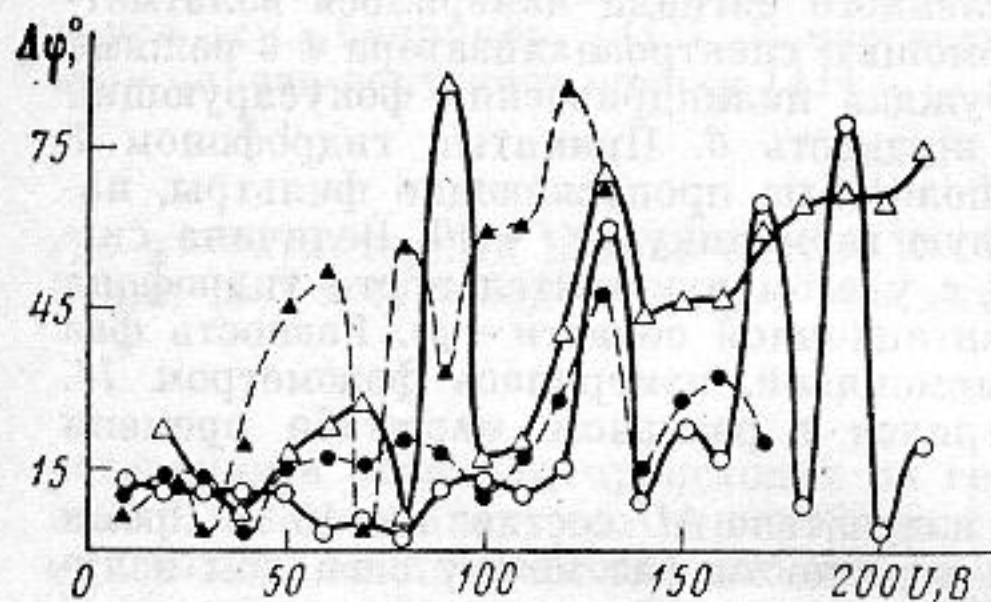


Рис. 4

Рис. 2. Зависимость давления в кавитационной области от напряжения на излучателе (1 —  $f=800$  Гц,  $h=0,5$  м; 2 —  $f=800$  Гц,  $h=2,0$  м; 3 —  $f=2300$  Гц,  $h=0,5$  м; 4 —  $f=2300$  Гц,  $h=2,0$  м)

Рис. 3. Коэффициент нелинейных искажений в зависимости от напряжения на излучателе (обозначения те же, что и на рис. 2)

Рис. 4. Разность фаз между волной излучения и ее первой гармоникой в зависимости от напряжения на излучателе (обозначения те же, что и на рис. 2)

дует из зависимости  $p_f$  от  $U$  (рис. 2), где процесс кавитации при  $U > 120$  В проходит через ряд «ступенек». То что в области «ступенек» происходит интенсивная перекачка энергии в высшие составляющие спектра, следует из экстремальных изменений разности фаз между волной излучения и первой гармоникой (рис. 4). Для частоты  $f=800$  Гц каждой из «ступенек» соответствует изменение разности фаз  $\Delta\varphi$  от 50 до 70°, с последующим возвращением на средний уровень. На частоте излучения  $f=2300$  Гц после первого экстремального изменения разности фаз среднее значение  $\Delta\varphi$  увеличивается, что, по-видимому, связано с более интенсивным процессом генерации высших гармоник (рис. 4).

На глубине  $h=0,5$  м происходит бурное нарастание гармонических составляющих при  $U > 100$  В (рис. 3). Для частоты  $f=2300$  Гц имеет место лишь одна «ступенька» в зависимости  $p_f$  от  $U$  (рис. 2). На частоте  $f=800$  Гц, при двух «ступеньках», первая слабо выражена.

Изменения разности фаз устойчиво коррелируют с переходом к различным стадиям кавитации. Для частоты  $f=800$  Гц в области слабо выраженного первого порога изменение разности фаз  $\Delta\varphi$  составляет 20–25°, а в области второго порога эти изменения составляют 15–20°. Для частоты  $f=2300$  Гц после экстремального изменения в области линейного участка зависимости  $p_f$  среднее значение разности фаз  $\Delta\varphi$  увеличивается, а экстремальное изменение в области порога составляет 40°. Для обеих частот физическим ограничением процесса кавитации является переход в паровую стадию с нестабильными во времени параметрами  $p_f$  и  $\Delta\varphi$ .

Из полученных результатов следует, что процесс ультразвуковой кавитации в приповерхностном слое моря с увеличением глубины идет при более высоких амплитудах звукового поля и проходит ряд стадий, где наблюдается как более интенсивная перекачка энергии по спектру, так и стабилизация этого процесса. Кавитационная прочность, определяемая как величина давления, соответствующая первой области интенсивной перекачки энергии по спектру, не зависит от глубины. Коэффициент нелинейных искажений уменьшается с ростом глубины и увеличивается с ростом частоты внешнего поля. Экстремальные изменения разности фаз между волной излучения и ее первой гармоникой коррелируют как с порогом кавитации, так и с переходами к последующим стадиям кавитационного процесса.

Эти результаты можно качественно объяснить, используя предположение о преобладающем влиянии на кавитационный процесс фазовых включений в жидкости [3]. Отсутствие зависимости величины кавитационной прочности от глубины свидетельствует об однородности распределения зародышей кавитации в приповерхностном слое в условиях эксперимента. Уменьшение коэффициента нелинейных искажений с ростом глубины связано со стабилизацией кавитационного процесса при увеличении внешнего давления, а увеличение  $k$  с ростом частоты ультразвукового поля определяется степенным законом увеличения числа газовых пузырьков в натуральных условиях с уменьшением их размеров [4]. Экстремальные изменения разности фаз  $\Delta\varphi$  отражают изменения дисперсионных свойств жидкости на различных стадиях кавитационного процесса.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lauterborn W., Cramer E.* On the dynamics of acoustic cavitation noise spectra // *Acustica*. 1981. V. 49. № 4. P. 280-287.
2. *Lauterborn W., Cramer E.* Acoustic cavitation noise spectra // *Appl. Sci. Res.* 1982. № 38. P. 209-214.
3. *Apfel R. E.* Acoustic cavitation prediction // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1981. V. 69. № 6. P. 1624-1633.
4. *Акуличев В. А., Буланов В. А., Кленин С. А.* Акустическое зондирование газовых пузырьков в воде // *Акуст. журн.* 1986. Т. 32. № 3. С. 289-295.

Институт проблем морских технологий  
ДВО Академия наук СССР

Поступило в редакцию  
14.06.89