

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА КАВИТАЦИОННОГО ШУМА В ПОЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЫ

Минчук В.С., магистрант гр.315441, Дежкунов Т.А., студент гр.350541, Олешук
И.Е., студент гр. 211802

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Дежкунов Н.В. – канд. техн. наук

Аннотация. В работе представлены результаты измерения амплитуды основной гармоники спектра кавитационного шума, субгармоники и величины суммарного сигнала в диапазоне частот 10-1000 кГц в узлах и пучностях ультразвуковой ванны с рабочей частотой 35 кГц. Показано, что отношения амплитуд основной гармоники, измеренной в различных точках поля (узлах и пучностях), существенно отличается от таких отношений для остальных измеренных величин. Установлена высокая степень корреляции между субгармоникой и суммарным широкополосным сигналом.

Ключевые слова. кавитация, спектр кавитационного шума, ультразвуковая ванна.

Введение. Ультразвуковая кавитация представляет собой явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления ультразвуковой частоты [1].

К настоящему времени предложено значительное количество методов оценки уровня активности кавитации, основанных на регистрации эффектов, сопровождающих кавитацию. Это такие явления как кавитационная эрозия (разрушение твердых тел под действием кавитации), генерирование свечения в видимой области спектра – звуколюминесценции, кавитационный шум, ультразвуковой капиллярный эффект, различные звукохимические реакции [2].

Разработка приборов для исследования кавитации с использованием кавитационного шума является одним из наиболее перспективных направлений в данной области. Для оценки активности кавитации предлагалось использовать различные составляющие спектра кавитационного шума. Наиболее распространены оценка активности кавитации по субгармонической составляющей спектра [3, 4] и интегрирование акустического сигнала в некотором диапазоне частот [5–7].

Методика и оборудование. Уровень жидкости в ультразвуковой ванне размером 155×140×100 мм и рабочей частотой 35 кГц составляет 74 мм, что приблизительно соответствует $7/4 \lambda$ (λ – длина волны на частоте колебаний излучателя). Данный уровень жидкости является оптимальным, для образования стоячих звуковых волн. В реальных системах звуковое поле представляет собой комбинацию стоячей и бегущей волн: имеются квазипериодические экстремумы (узлы и пучности), причем в узлах давление не приближается к нулевому из-за наличия бегущей компоненты. В пучностях звуковой волны интенсивность захлопывания кавитационных пузырей (активность кавитации) максимальна, в узлах – минимальна.

Для нахождения экстремумов активности кавитации провели следующий эксперимент. Пьезоэлектрический датчик кавитации размещался по центру ванны у поверхности жидкости, затем двигался ко дну ванны с шагом 2 мм. При помощи кавитометра IC-3 (БГУИР) фиксировался полный выходной сигнал датчика в диапазоне 10-10000 кГц. По показаниям прибора определены координаты максимумов активности кавитации (пучности звуковой волны) – 18, 42, 65 мм от излучателя (дна ванны), а также минимумов (узлы звуковой волны) – 30, 53 мм. Расстояние между соседними максимумами/минимумами приблизительно равняется половине длины волны.

На полученных расстояниях от излучателя проведено измерение амплитуд компонент спектра кавитационного шума. Для регистрации компонент спектра кавитационного шума и расчета различных оценок активности кавитации использовался спектрально-акустический индикатор ICA-7DS (БГУИР). Спектр кавитационного шума (рисунок 1) включает гармоники n -го порядка частотой $f_n = nf_1$ (где n – целое число) и амплитудой A_n , субгармонику частотой $f_s = f_1/2$ и амплитудой A_s , ультрагармоники с частотой $f_{un} = (2n+1)f_1/2$ и амплитудой A_{un} , а также широкополосную составляющую (WBN).

Датчик кавитации поочередно размещался узлах и пучностях звукового поля, в течение 30 секунд при помощи индикатора ICA-7DS производилась регистрация следующих величин:

- амплитуды основной гармоники A_1 ;
- амплитуды субгармоники A_s ;
- величины суммарного сигнала S в диапазоне 10-1000 кГц (сумма всех точек спектра в заданном диапазоне, каждый спектр в данном диапазоне содержит 2048 точек);
- величины суммарного сигнала SWH в диапазоне 10-1000 кГц с вычетом гармоник и ультрагармоник. Для расчета данной величины амплитуда каждой гармоники и ультрагармоники заменяется на значение, соответствующее уровню непрерывной составляющей спектра. Затем

происходит суммирование амплитуд всех точек спектра из диапазона.

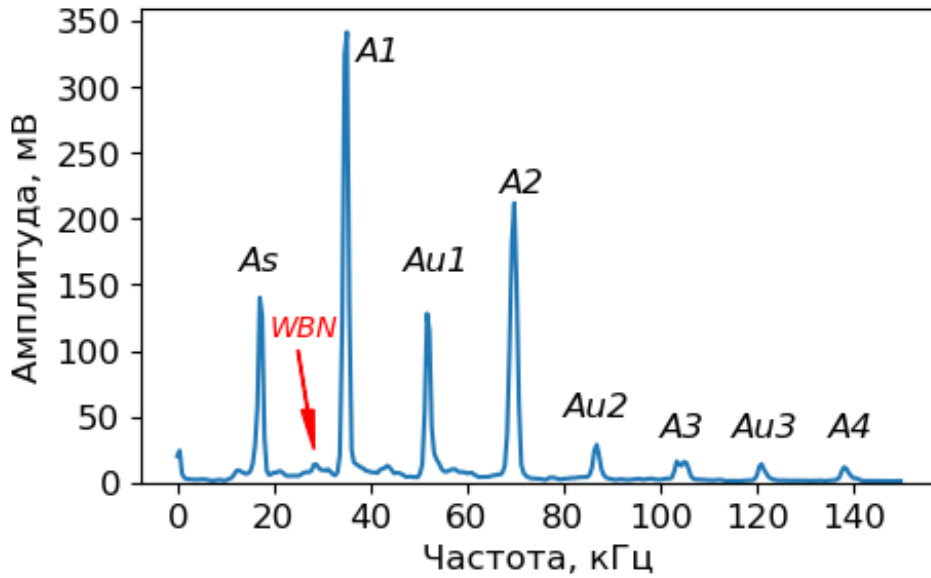


Рисунок 1 – Спектр кавитационного шума

Результаты. На рисунке 2 представлены распределения амплитуд исследуемых компонент спектра, в зависимости от расстояния до излучателя. Вертикальными линиями отмечено стандартное отклонение показаний прибора в течение записи.

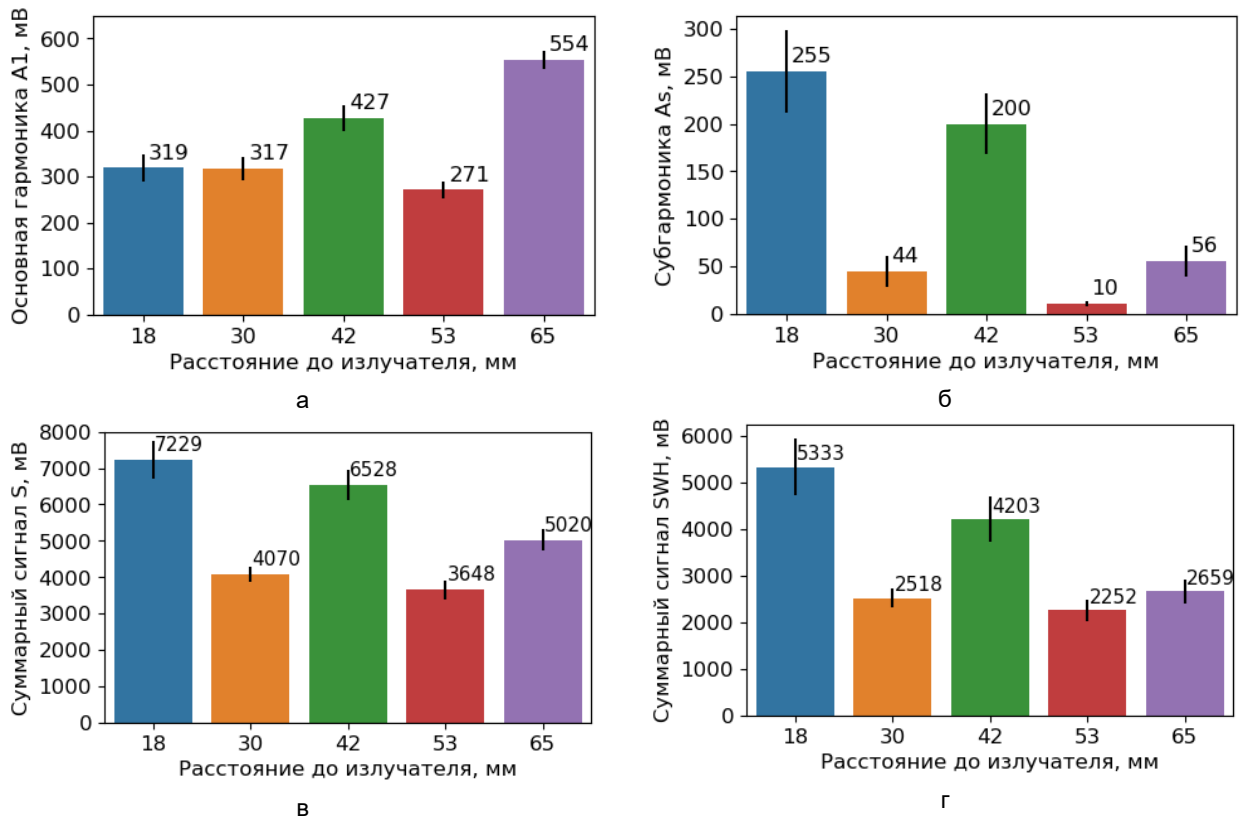


Рисунок 2 – Распределение амплитуды составляющих спектра кавитационного шума: а – основная гармоника; б – субгармоника; в – суммарный сигнал в диапазоне 10–10000 кГц; г – суммарный сигнал в диапазоне 10–10000 кГц без учета гармоник и ультрагармоник

К механизмам формирования основной (первой) гармоника спектра можно отнести исходное синусоидальное звуковое поле излучателя и колебания стабильных кавитационных пузырей на частоте излучателя. В результате в общем спектре шума первую гармонику нельзя приписать только прямому полю, однако можно предположить, что исходное поле излучателя вносит основной эффект. Тогда

более высокие значения амплитуды первой гармоники должны соответствовать более высокому давлению в жидкости, что соответственно приводит к более интенсивному схлопыванию кавитационных пузырей. Согласно полученным данным (рисунок 2а), наибольшее значение амплитуды основной гармоники наблюдается вдали от излучателя на расстоянии 65 мм. Распределения амплитуд субгармоники A_s (рисунок 2б), суммарного сигнала S и суммарного сигнала с вычетом гармоник и ультрагармоник SWH (рисунок 2 в, г), которые зачастую используются в качестве оценки активности кавитации, показывают противоположную тенденцию – максимум амплитуды наблюдается вблизи излучателя.

Все рассмотренные составляющие спектра имеют общую закономерность – уменьшение амплитуды в узлах звукового поля (30, 53 мм от излучателя) и увеличение амплитуды в пучностях (18, 30, 65 мм от излучателя). Различия заключаются в соотношении величины составляющих между экстремумами поля.

Распределение амплитуды основной гармоники спектра более равномерно по сравнению с остальными величинами. Субгармоника претерпевает максимальное изменение амплитуды (в %) при переходе между соседними экстремумами. Тенденция распределения суммарного сигнала (S и SWH) схожа с распределением субгармонической составляющей, однако разница между величинами (в %) в узлах и пучностях звуковой волны гораздо меньше.

Считается, что гармонические компоненты в спектре не связаны с захлопыванием кавитационных пузырей (т.е. с активностью кавитации), соответственно их следует исключить из рассмотрения при вычислении суммарного сигнала в некотором диапазоне частот. Проведенный эксперимент показывает, что исключение гармоник и ультрагармоник из суммарного сигнала не привело к значительным изменениям распределения.

На рисунке 3 показана тепловая карта взаимной корреляции исследуемых компонент спектра, на пересечении соответствующих строк и столбцов указан коэффициент корреляции Пирсона. Величины A_s , S и SWH имеют высокую степень взаимосвязи, несмотря на то, что имеют различную природу возникновения. Некоторые авторы указывают, что причиной возникновения субгармоники (A_s) в спектре являются колебания с удвоенным периодом стабильных пузырей, с размерами больше резонансного, и/или колебания всей кавитационной области на частотах f_1/m (m – целое число). Формирование непрерывной составляющей спектра связывают с захлопыванием кавитационных пузырей (SWH рассчитывается как сумма амплитуд непрерывной составляющей, S – дополнительно включает гармоники и ультрагармоники).

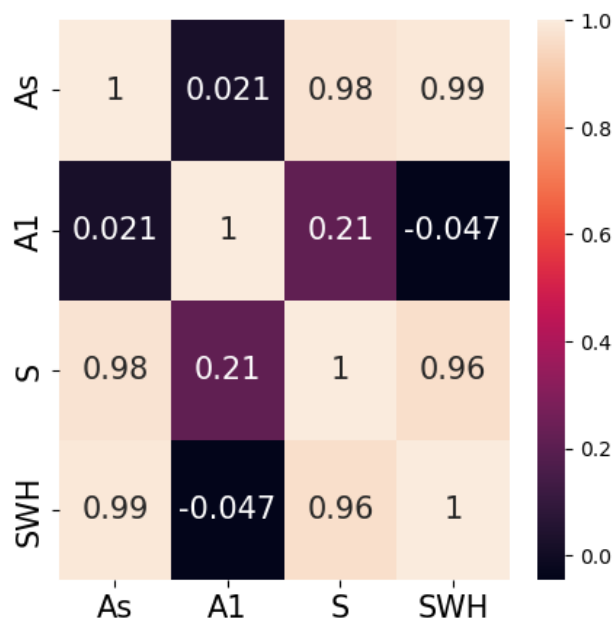


Рисунок 3 – Тепловая карта взаимной корреляции составляющих спектра

Наличие корреляции величин A_s , S и SWH может указывать на ошибочность существующих представлений о механизме генерирования исследовавшихся компонент кавитационного шума. Для выяснения данного вопроса требуется проведение дополнительных исследований.

Заключение. Показано, что распределение амплитуды составляющих спектра кавитационного шума имеют общую закономерность – уменьшение амплитуды в узлах звукового поля и увеличение амплитуды в пучностях.

Показано, что амплитуда основной гармоники спектра кавитационного шума в пучностях звуковой

волны увеличивается при удалении от излучателя. В свою очередь, амплитуда субгармоники, суммарный сигнал в диапазоне 10–1000 кГц и суммирование непрерывной составляющей спектра в диапазоне 10–1000 кГц имеют противоположную тенденцию – уменьшение значений при удалении от излучателя.

Установлена высокая степень корреляции между величиной субгармоники и величин, основанных на измерении широкополосного сигнала несмотря на их различную природу происхождения.

Список использованных источников:

1. Wu, P. Mechanism and dynamics of hydrodynamic- acoustic cavitation(НАС) / P. Wu, L. Bai, W. Lin, X. Wang // *Ultrason. Sonochem.* 49 (2018) P. 89–96.
2. Скворцов, С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации / С.П. Скворцов // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* – 2015. – № 2. – С. 83–100.
3. Tan, K.L. Bubble dynamics and cavitation intensity in milli-scale channels under an ultrasonic horn / K.L. Tan, S.H. Yeo // *Ultrason. Sonochem.* 58 (2019), P. 104666.
4. Yusuf, L. Characterising the cavitation activity generated by an ultrasonic horn at varying tip-vibration amplitudes / L. Yusuf, M.D. Symes, P. Prentice // *Ultrason. Sonochem.* 70 (2021), P. 105273.
5. Balachandran, R. Characterization of stable and transient cavitation in megasonically irradiated aqueous solutions / R. Balachandran, M. Zhao, P. Yam, C. Zanelli, M. Keswani // *Microelectron. Eng.* 133 (2015) P. 45–50.
6. Tzanakis, I. Investigation of the factors influencing cavitation intensity during the ultrasonic treatment of molten aluminium / I. Tzanakis, G.S.B. Lebon, D.G. Eskin, K. Pericleous // *Mater. Des.* 90 (2016) P. 979–983.
7. Grosjean, V. Axial acoustic field along a solid- liquid fluidized bed under power ultrasound / V. Grosjean, C. Julcour, O. Louisnard, L. Barthe // *Ultrason. Sonochem.* 56 (2019), P.274–283.

STUDY ON THE RELATIONSHIP OF COMPONENTS OF THE CAVITATION NOISE SPECTRUM IN THE FIELD OF AN ULTRASONIC BATH

Minchuk V.S., Dezhkunov T.A., Oleshuk I.E.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dezhkunov N.V. – PhD

Annotation. The paper presents the results of measuring the amplitude of the fundamental harmonic of the cavitation noise spectrum, the subharmonic and the magnitude of the total signal in the frequency range 10-1000 kHz at the nodes and antinodes of an ultrasonic bath with an operating frequency of 35 kHz. It is shown that the ratios of the amplitudes of the fundamental harmonic measured at various points of the field (nodes and antinodes) differ significantly from such ratios for other dependent quantities. A high degree of correlation has been established between the subharmonic and total signal.

Keywords. cavitation, cavitation noise spectrum, ultrasonic bath.