

УДК 534.322.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СПЕКТРОВ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

ЖАРКО Н. А., ШЕБЕКО В. П., ФЕДОРИНЧИК М. П., ДЕЖКУНОВ Н. В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: n.zharko@bsuir.by

Аннотация. Показано, что интенсивность непрерывной составляющей в спектре кавитационного шума существенно увеличивается при интенсивности ультразвука, соответствующей появлению первых признаков эрозионной активности кавитации. Кавитационная эрозия обусловлена ударными волнами и микроструями жидкости, генерируемыми при захлопывании пузырьков. Поэтому данный результат позволяет вывод, что и непрерывная составляющая КШ связана с захлопывающимися кавитационными полостями, т.е. – с нестационарной кавитацией. Предложено использовать интегральную интенсивность непрерывной составляющей кавитационного шума для детектирования нестационарной кавитации.

Abstract. It is shown that the intensity of the continuous component in the spectrum of cavitation noise increases significantly at an ultrasound intensity corresponding to the appearance of the first signs of erosive cavitation activity. Cavitation erosion is caused by shock waves and liquid microjets generated by the collapse of bubbles. Therefore, this result allows us to conclude that the continuous component of the cavitation noise is associated with collapsing cavitation cavities, i.e. - with non-stationary cavitation. It is proposed to use the integral intensity of the continuous component of cavitation noise to detect non-stationary cavitation.

Введение

В настоящее время общепризнано, что ультразвуковая интенсификация физико-химических процессов в жидкости имеет кавитационную природу, т.е. связана с явлением образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости является [1-3].

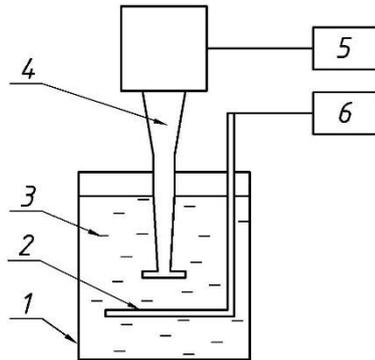
В последние годы обнаружены новые возможности воздействия ультразвуком в кавитационном режиме на биологические структуры, например: повышение проникающей способности лекарств через мембраны клеток – сонопорация [4], подавление роста опухолевых клеток [5], усиление действия лекарств или выделение лекарств из носителей [6] и другие. Однако закономерности развития кавитационной области изучены недостаточно, а известные в литературе данные во многих случаях противоречивы и характеризуются низкой воспроизводимостью, что сдерживает широкое внедрение передовых ультразвуковых технологий в медицине и технике.

Интенсивность воздействия кавитации на различные процессы (или активность кавитации) определяется концентрацией кавитирующих полостей и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в другие виды энергии, в частности, тепловую и энергию ударных волн. Многочисленными исследованиями показано, что активность кавитации не определяется однозначно интенсивностью ультразвука, зависит от свойств жидкости, ее газосодержания, температуры, наличия зародышей кавитации других параметров [1, 2]. Многие из параметров, влияющих на активность кавитации, могут неконтролируемо изменяться во времени при воздействии ультразвуком на жидкости или на жидкообразные среды, например, за счет дегазации или в результате химических реакций [7, 8, 9].

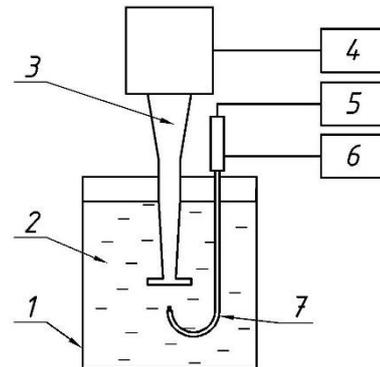
При пульсациях и захлопывании полостей в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал – кавитационный шум (КШ). Спектральный анализ КШ может служить эффективным методом исследования кавитации [10, 11, 12]. Однако разработка методов исследования кавитации с использованием КШ затрудняется тем, что механизмы генерирования спектральных компонент КШ не выяснены в полной мере. В связи с изложенным в данной работе исследовалась эволюция спектров кавитационного шума при увеличении интенсивности ультразвука (УЗ) в низкочастотном ультразвуковом поле.

Методика и оборудование

Схема измерений представлена на рисунке 1.



1 – емкость, 2 – держатель с фольгой,
3 – жидкость, 4 – излучатель,
5 – генератор,
6 – позиционирующее устройство



1 – емкость, 2 – жидкость, 3 – излучатель,
4 – генератор, 5 – кавитометр,
6 – позиционирующее устройство,
7 – датчик

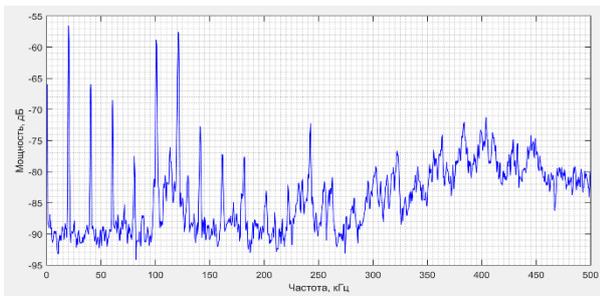
Рис. 1. Схема установки для исследования кавитационного шума (справа) и эрозионной активности кавитации (слева)

В ходе исследований интенсивность УЗ поля меняли путем изменения напряжения на излучателе. Предварительно проведена калибровка излучателя по мощности. Эксперименты выполнены на частоте 22,7 кГц. Пример эволюции спектра кавитационного шума (КШ) представлен на рисунке 2. Уровень фонового шума при отсутствии ультразвука, т.е. нулевой уровень в среднем равен – 90 дБ. Зависимости представлены в логарифмическом масштабе.

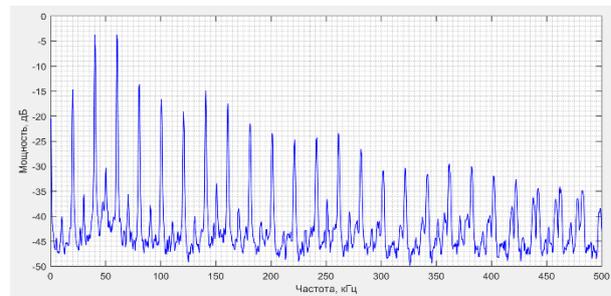
Результаты и обсуждение

Сравнение и анализ спектров КШ позволяет сделать следующие выводы. При интенсивности ультразвука порядка порога кавитации (рис. 2а) низкочастотная часть спектра ($f_0 \leq 150$ кГц) включает гармоники nf_0 , где n – целое число. Непрерывная компонента практически отсутствует. В высокочастотной области ($f_0 > 250$ кГц) гармоники менее выражены на фоне высокочастотной компоненты. Субгармоники $(n+1/2)f_0$ в этом режиме отсутствуют. Отметим, что при данной интенсивности ультразвука не наблюдается кавитационной эрозии.

По мере роста интенсивности ультразвука $I_{уз}$ интенсивность непрерывной компоненты быстро увеличивается (рис. 1б – 1г). Кроме гармоник появляются частоты $(1/2)f_0$ и $(n+1/2)f_0$. Интенсивности гармоник nf_0 и частот $(n+1/2)f_0$ на первом этапе увеличиваются быстро (рис. 1а – 1б), а при дальнейшем увеличении $I_{уз}$ стремятся к некоторому предельному состоянию или уменьшаются.



а)



б)

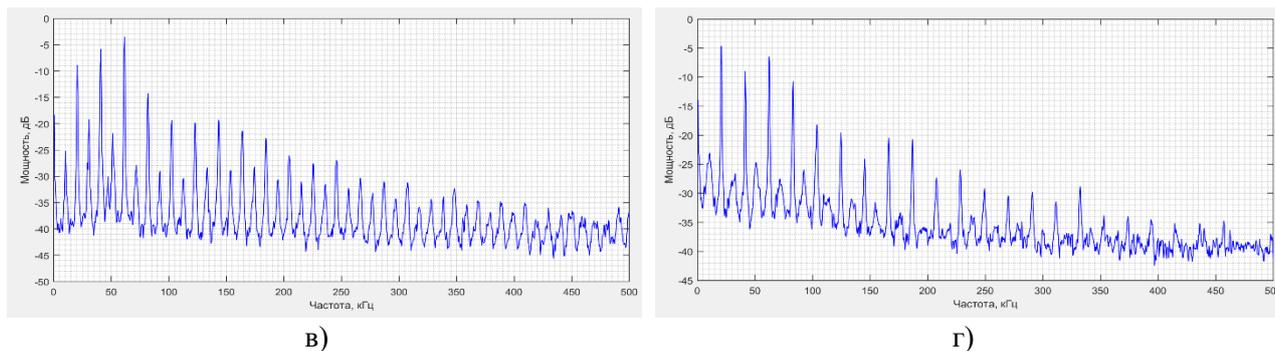


Рис. 2. Эволюция спектров кавитационного шума при увеличении интенсивности ультразвука. Интенсивность ультразвука, Вт/см²: а) 1,2; б) 2,5; в) 5,7; г) 10,5

Первые признаки разрушающего воздействия кавитации на тест – образцы из алюминиевой фольги регистрируются при интенсивности ультразвука $2,7...3,1$ Вт/см², что близко к интенсивности, при которой снят спектр на рис. 2б. Далее, при увеличении $I_{уз}$ скорость кавитационной эрозии и интенсивность непрерывной компоненты КШ увеличиваются во всем диапазоне изменения $I_{уз}$. Поскольку общепризнано, что кавитационная эрозия связана с захлопыванием пузырьков, т.е. с нестационарной кавитацией, полученные результаты позволяют сделать вывод, что непрерывная составляющая в спектре кавитационного шума также генерируется захлопывающимися пузырьками. Следовательно, интегральная интенсивность непрерывной составляющей КШ может использоваться для детектирования нестационарной кавитации, т.е. захлопывающихся кавитационных полостей и оценки активности кавитации.

Список использованных источников

1. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008, 271С.
2. Leighton T.G. Acoustic Bubble.- London.: Pergamon Press, 1995, 650 P.
3. Маргулис М.А. Основы звукохимии.- М.: Химия, 1986, 375 С.
4. Qin P., Xu L., Han T., Du L.F., Yu A.C.H. Effect of non-acoustic parameters on heterogeneous sonoporation mediated by single-pulse ultrasound and microbubbles // Ultrasonics Sonochemistry, V.31, 2016, P. 107-115.
5. Costley P. D., Ewan C. Mc, Fowley C., McHale A.P., Atchison J., Nomikou N., Callan J.F. Treating cancer with sonodynamic therapy: a review // Int. J. Hyperth. V. 31 №2, 2015, P. 107–117.
6. Hesham G.M., Ana M.M., Ghaleb A.H. Review on Triggered Liposomal Drug Delivery with a Focus on Ultrasound // Current Cancer Drug Targets. V. 15, 2015, P. 282–313.
7. Котухов А.В., Жарко Н.А., Минчук В.С., Дежкунов Н.В. Кавитация в водных растворах углекислого газа // Проблемы физики, математики и техники. V. 4, Т. 41, 2019, С. 35-41.
8. Barchouchi A., Molina-Boisseau S., Gondrexon N., Baup S. Sonochemical activity in ultrasonic reactors under heterogeneous conditions // Ultrasonics Sonochemistry. 1 2021, V. 72, Article 105407.
9. Brezhneva N., Dezhkunov N.V., Mazheika S. O., Nenashkina A., Skorb E. V. Evolution of cavitation activity during the ultrasonic magnesium nanostructuring. // International Journal of nanoscience. V. 18, № 3&4, – 2019, P. 1940071-1 – 1940073-3.
- [10] Leighton T.G., Birkin P.R., Hodnett M., Zeqiri B., Power J. F., Price G. J., Mason T., Plattes M., Dezhkunov N., Coleman A.J. In Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications, ed. // Research Signpost. – 2005, P. 37-94.
- [11] Скворцов С.П., Масленков Н.С., Нечаев В.И., Кравченко А.П. // Медицинская техника. – 2019, Т.5, С. 38-42.