

СТАДИИ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ УЗ ПОЛЕ НА ГРАНИЦЕ ЭЛЕКТРОД-ЭЛЕКТРОЛИТ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

При использовании ультразвука для воздействия на физико-химические процессы в жидкостях, включая и электрохимические, выделяют обычно два ключевых режима: докавитационный - при интенсивности ниже порога кавитации - и кавитационный. В кавитационном режиме обеспечивается возможность варьирования интенсивности воздействия в существенно более широком диапазоне, чем в докавитационном.

Активность кавитации определяется числом кавитационных пузырьков в единице объема жидкости и эффективностью преобразования энергии ультразвука в энергию ударных волн и микроструй жидкости.

В ряде работ показано, что активность кавитации может оцениваться по интенсивности L свечения, генерируемого кавитационной областью - звуколюминесценции (ЗЛ) [1-3]. В данной работе впервые выделено четыре стадии развития кавитационной области, отличающиеся характеристиками кавитационных эффектов – звуколюминесценции, кавитационного шума и поглощения ультразвука в кавитационной области.

Рабочая емкость представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 100 мм и высотой 160 мм. Резонансная частота пьезоэлемента $f_0 = 720$ кГц. На уровне фокального пятна излучателя в боковой поверхности емкости выполнено окно, в котором установлен фотоумножитель PhillipsXP1110 со световодом диаметром 20 мм.

Выходные сигналы фотоумножителя L и гидрофона H (после предварительного усиления) подавались на многоканальный цифровой осциллограф Hewlett Packard 54601A. Для записи спектров акустического сигнала, принимаемого гидрофоном, использовался анализатор спектра Hewlett Packard E4411B. Напряжение U на излучателе в экспериментах увеличивали линейно во времени.

Установлено, что на первом этапе выходной сигнал гидрофона H увеличивается пропорционально U . Незадолго до возникновения ЗЛ отмечается отклонение выходного сигнала гидрофона от первоначальной прямой в сторону уменьшения наклона зависимости

$N(t)$, что указывает на увеличение поглощения энергии ультразвука. Одновременно с возникновением ЗЛ меняется характер кривой $N(t)$, а именно: появляется значительный разброс сигнала, записываемого осциллографом. При некотором критическом значении напряжения U наклон зависимости $L(t)$ изменяется скачком, т.е. скорость роста интенсивности ЗЛ резко увеличивается. Быстрый рост L сопровождается соответствующим быстрым падением выходного сигнала гидрофона N .

Полный акустический сигнал N является результатом суммирования исходного ультразвукового поля и акустической эмиссии, генерируемой кавитационными пузырьками – кавитационного шума. Захлопывающимися полостями генерируются ударные волны, которые могут быть причиной импульсов повышенной интенсивности. Быстрое увеличение поглощения ультразвука в этом режиме связано, по-видимому, с началом размножения кавитационных пузырьков по механизму цепной реакции, описанному в работе [4]. После быстрого роста интенсивность ЗЛ стремится к некоторому предельному значению и затем начинает уменьшаться. На основании приведенных выше результатов можно выделить 4 стадии развития кавитационной области: 1 - возникновение пузырьков и их пульсации без генерирования звуколюминесценции; 2 - возникновение свечения и медленный рост интенсивности ЗЛ при слабом увеличении поглощения ультразвука; 3 - быстрый (часто скачкообразный) рост интенсивности ЗЛ, сопровождающийся быстрым ростом увеличения поглощения ультразвука в кавитационной области; 4 - состояние насыщения кавитационной области, в котором интенсивность ЗЛ уменьшается с ростом интенсивности ультразвука.

На рисунке 1 приведены спектры кавитационного шума для различных интенсивностей ультразвука, соответствующих описанным выше стадиям развития кавитационной области. При интенсивности ультразвука ниже порога кавитации в спектре представлена только основная частота f_0 (на рисунке не показано). Гармоника $2f_0$ появляется до возникновения ЗЛ (рис. 1а).

Соответствующий звуковой сигнал генерируется, вероятно, в результате нелинейных пульсаций кавитационных полостей с относительно небольшой амплитудой. Низкая интенсивность первой гармоники и отсутствие в спектре более высоких гармоник позволяет считать, что объемная концентрация пузырьков в фокальной области излучателя при этом незначительна и что характер их пульсаций мало отличается от линейных.

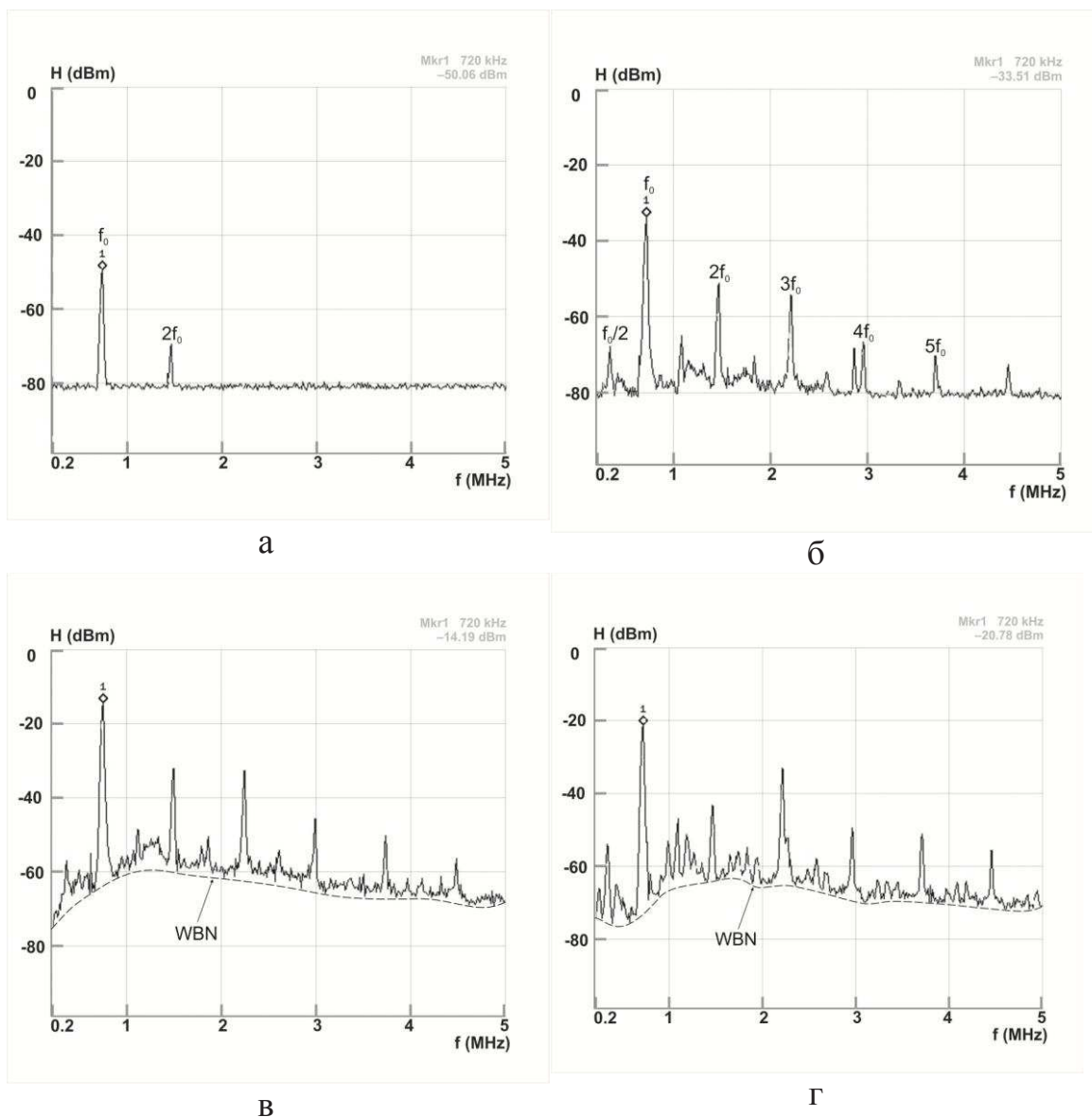


Рисунок 1 – спектры кавитационного шума для рзличных стадий развития кавитационной области

Появление в спектре акустического сигнала гармоник $3f_0$, $4f_0$ и более высоких (рис. 1б) связано, по-видимому, с возникновением нелинейно пульсирующих полостей и существенным увеличением их объемной концентрации. Одновременно появляется и субгармоника $f_0/2$, а также частоты $nf_0/2$, где $n=2, 3, 4$ и т.д. При интенсивности ультразвука выше порога ЗЛ, т.е. на второй стадии развития кавитационной области регистрируются и более высокие гармоники nf_0 . ($n \geq 5$). Увеличение интенсивности ультразвука приводит к дальнейшему расширению спектра в сторону высокочастотных составляющих и возникновению широкополосного шума (WBN).

Третья стадия характеризуется быстрым ростом интенсивности высокочастотных гармоник и широкополосной составляющей (рис. 1в). В режиме, соответствующем максимуму интенсивности ЗЛ достигается также и максимальное значение непрерывной составляющей кавитационного шума. На четвертой стадии существенно увеличивается интенсивность субгармоники $f_0/2$ (рис. 1г), а вблизи субгармоники и частот $nf_0/2$ слева и справа появляются дополнительные частоты. Важной особенностью эволюции кавитационной области при переходе от стадии 3 к стадии 4 является уменьшение интенсивности сигнала на частоте f_0 , несмотря на увеличение излучаемой мощности. Последнее указывает на значительное увеличение поглощения ультразвука в кавитационной области. Увеличение объемной концентрации пузырьков в кавитационной области выше некоторой оптимальной и образование больших полостей – два фактора, способствующих снижению эффективности преобразования и концентрации энергии ультразвука при их захлопывании, что и приводит к уменьшению интенсивности ЗЛ на 4-й стадии развития кавитационной области. Из представленных выше данных следует, что спектральные характеристики кавитационного шума кардинально различаются для каждой из упомянутых выше стадий развития кавитационной области. Последнее обстоятельство позволяет надежно идентифицировать упомянутые выше стадии.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Dezhkunov, N.V., et al. Sonoluminescence and Subharmonic Generation in a cavitation Zone of Aqueous Sodium Chloride Solutions//J.Eng.Phys.- Vol. 51, Sept. 1986, pp.1052-1058.
- 2 Pickworth M. J. W., Dendy P. P., Leighton T. G., and Walton A. J. Studies of the cavitation effects of clinical ultrasound by sonoluminescence// Phys. Med. Biol. 33, 1249 (1988).
- 3 Shuangwei Wang, Ruo Feng, Xiping Mo. Study on pulse cavitation peak in an ultrasound reverberating field// Ultrasonics Sonochemistry, 1996, 3, 65-68.
- 4 Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P., Mason T.J., Iernetti G., Kulak A. I. Enhancement of sonoluminescence emission from a multibubble cavitation zone// Ultrasonics Sonochemistry, 2000, 7, 19 - 24.