

Н.В. Дежкунов, доц., канд. техн. наук;
В.С. Гаврилюк; М.П. Федоринчик;
В.А. Колтович, канд. техн. наук; Л.К. Кушнер
БГУИР, г. Минск

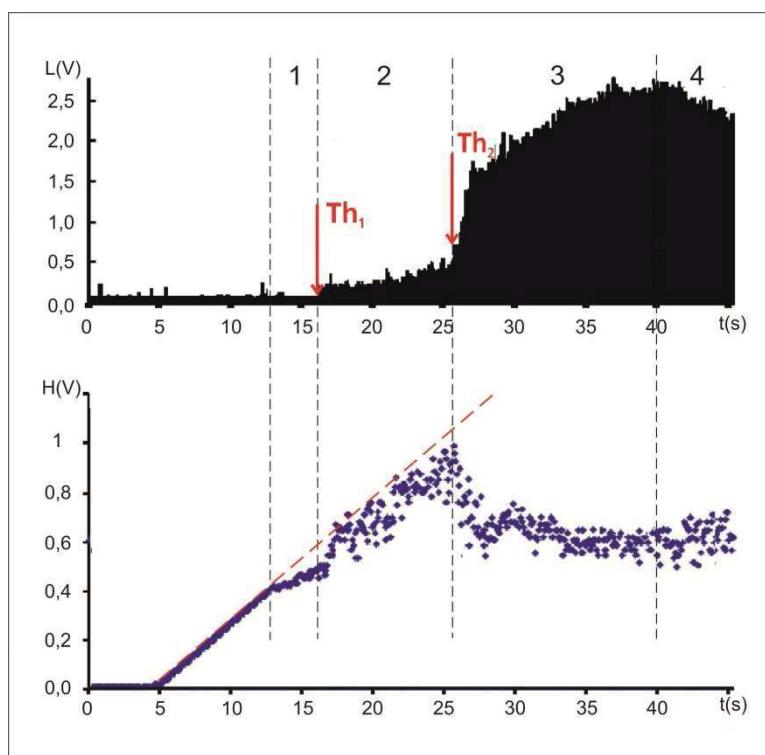
МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТЯХ И ЭЛЕКТРОЛИТАХ

В данной работе впервые выделено четыре стадии развития кавитационной области, отличающиеся характеристиками кавитационных эффектов – звуколюминесценции (ЗЛ), кавитационного шума (КШ) и поглощения ультразвука в кавитационной области.

Рабочая емкость использовавшейся установки представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 100 мм и высотой 160 мм. Пьезокерамический фокусирующий излучатель вмонтирован в днище емкости. 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. Гидрофон помещен за фокальным пятном на расстоянии 2,5 см. Выходные сигналы фотоумножителя L и гидрофона Н подавались на многоканальный цифровой осциллограф Hewlett Packard 54601A и анализатор спектра Hewlett Packard E4411B.

На рисунке 1 приведены результаты одновременной регистрации выходного сигнала фотоумножителя L (верхняя зависимость) и выходного сигнала гидрофона Н (нижний график) от времени t при плавном увеличении напряжения U на излучателе. На первом этапе, как видно из нижнего графика, выходной сигнал гидрофона увеличивается линейно со временем. Отклонение выходного сигнала гидрофона от первоначальной прямой в сторону уменьшения наклона зависимости $H(t)$ (примерно на 13-й секунде) указывает на увеличение поглощения энергии ультразвука вследствие возникновения кавитации. Момент возникновения звуколюминесценции отмечен стрелкой Th1- первый порог ЗЛ. Одновременно с возникновением ЗЛ меняется характер кривой $H(t)$, 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. Этот момент отмечен стрелкой Th2 - второй порог ЗЛ. Быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождается соответствующим быстрым падением

выходного сигнала гидрофона Н, что обусловлено увеличением поглощения ультразвука. 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. В последнем режиме визуально наблюдается образование больших стабильных пузырьков.

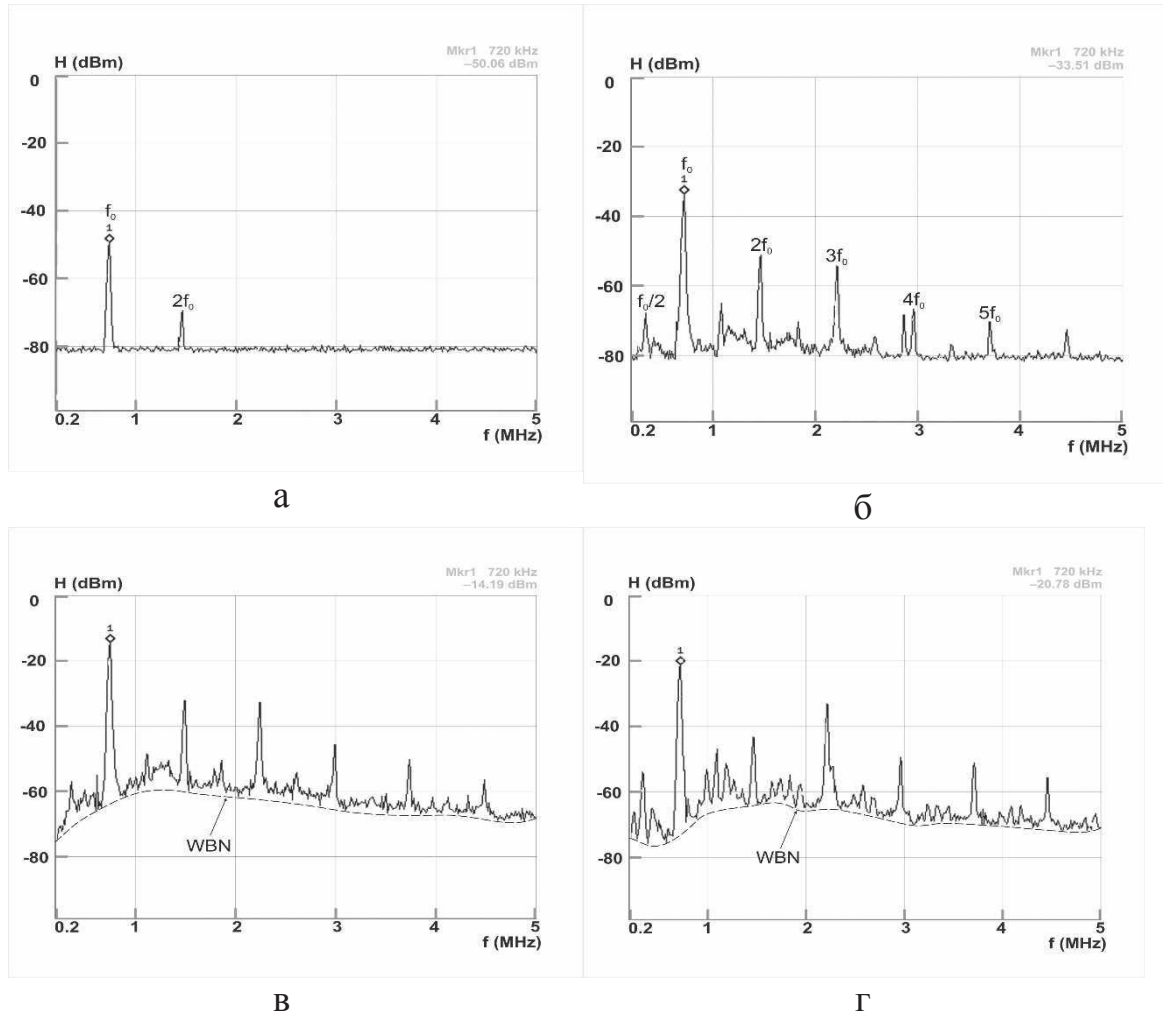


Период следования импульсов ультразвука $T=100\text{ms}$, длительность импульсов ультразвука $\tau = 3\text{ms}$. Вертикальными штриховыми линии отделены различные стадии развития кавитационной области. Скорость роста напряжения на излучателе, задаваемая программой – 7 В/с , температура жидкости – $21\pm 1,5^\circ\text{C}$

Рисунок 1 – эволюция кавитационной области при плавном увеличении амплитуды колебаний излучателя

На основании приведенных выше результатов можно выделить 4 стадии развития кавитационной области в поле фокусирующего излучателя: 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 ин-

тенсивности ультразвука. Отметим, что до сих пор в литературе обсуждалось в основном только два режима озвучивания: докавитационный и кавитационный [1, 2]. На рисунке 2 приведены спектры кавитационного шума для различных интенсивностей ультразвука, соответствующих описанным состояниям.



а – первая стадия, б - вторая, в - третья, г – четвертая стадии развития кавитационной области. $T=100$ мс, длительность импульсов ультразвука $\tau = 3$ мс. $t = 21 \pm 2^\circ\text{C}$. Штриховой линией показан уровень широкополосного шума – WBN (wideband noise).

Рисунок 2 – Спектры акустического сигнала для различных стадий 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. 2а). Соответствующий звуковой сигнал генерируется, вероятно, в результате нелинейных пульсаций кавитационных полостей с относительно небольшой амплитудой. Появление в спектре акустического сигнала гармо-

ник $3f_0$, $4f_0$ и более высоких (рис. 2б) связано, по-видимому, с возникновением нелинейно пульсирующих полостей и существенным увеличением их объемной концентрации (рис.1, стадия 2). Одновременно появляется и субгармоника $f_0/2$, а также частоты $nf_0/2$, где $n=2, 3, 4$ и т.д. 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. 2в). На четвертой стадии существенно увеличивается интенсивность субгармоники $f_0/2$ (рис. 2г). 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 [3]. 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. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008. – 271 с.
2. Bang, J.H., Suslick, K.S. Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials / J.H. Bang, K.S. Suslick // «Advanced Materials». – № 22 – 2010. – P. 1039–1059.
3. Dezhkunov N.V. The Evolution of a Cavitation Zone in a Focused Ultrasonic Field / A. Francescutto, F. Calligaris, A.L. Nikolaev // Technical Physics Letters, Vol. 40, No. 8, 2014.- P. 712-715.