

## МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ В ЖИДКОСТЯХ И ГЕЛЕВЫХ ИМИТАТАХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

*Н.В. Дежкунов, А. В. Котухов, М.П. Федоринчик, А.Л. Николаев*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, БГУИР, НИЛ 5.2, 220013, Минск, Беларусь, тел. +375 17 2938635  
E-mail: dnv@bsuir.by*

Abstract. The development of cavitation zone has been studied in liquids as well in gel imitators of biological structures. Experiments have been done for two different conditions: constant voltage applied to the transducer and linearly increasing voltage. Cavitation activity was estimated by the sonoluminescence (SL) intensity. Hydrophone output was registered simultaneously with the SL intensity. Four stages of cavitation zone development have been separated. It has been shown that spectra of cavitation noise are different at different stages. A method for the identification of the above stages has been proposed.

### **Введение**

В последние годы интенсивно расширяются исследования воздействия мощного и, в частности, фокусированного ультразвука на процессы в биологических структурах в докавитационном и кавитационном режимах озвучивания.

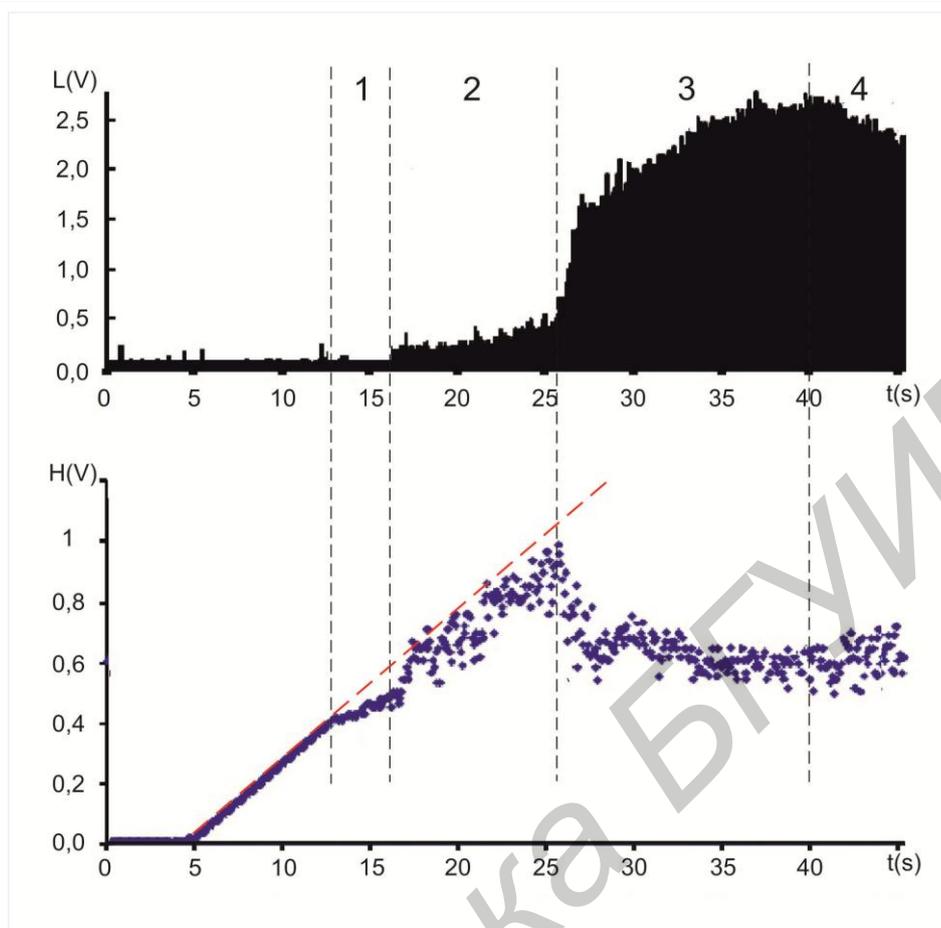
В литературе имеются сведения о широком спектре биологических эффектов в акустических полях в кавитационном и режиме [1,2]: 1) повышение скорости роста клеток и размножения бактерий, 2) повышение проницаемости мембран клеток (сонопорация) без существенного воздействия на жизнедеятельность клетки, 3) подавление роста и размножения клеток, 4) разрушение клеток без возможности восстановления их функций. Противоречивость результатов в значительной мере затрудняет разработку соответствующих методов терапии. Другим сдерживающим фактором является отсутствие надежных методов детектирования кавитации в биологических тканях, что не позволяет однозначно установить связь кавитации с биологическими эффектами ультразвука и выявить особенности воздействия различных типов кавитации.

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

### **Экспериментальная установка и методика исследований**

Детальное описание использовавшейся установки и методики приведено в работах [3]. Рабочая емкость 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 (после предварительного усиления) подавались на многоканальный цифровой осциллограф Hewlett Packard 54601A. Для записи спектров акустического сигнала, принимаемого гидрофоном, использовался анализатор спектра Hewlett Packard E4411B.

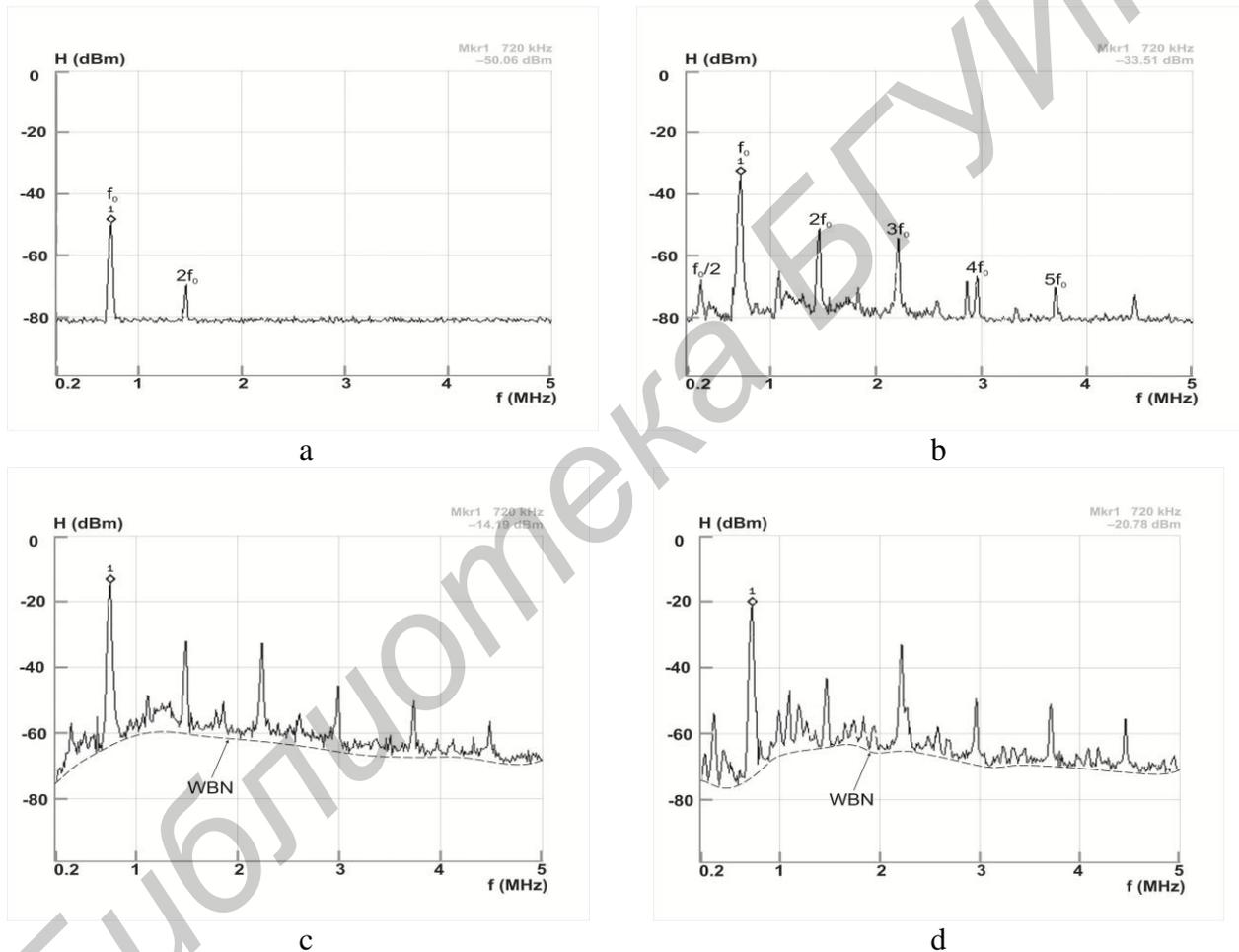


**Рисунок 1** - Результаты одновременной регистрации выходных сигналов фотоумножителя L и гидрофона H в импульсном фокусированном ультразвуковом поле при плавном увеличении напряжения на излучателе. Период следования импульсов ультразвука  $T=100\text{ms}$ , длительность импульсов ультразвука  $\tau = 3\text{ms}$ . Вертикальными штриховыми линиями отделены различные стадии развития кавитационной области. Скорость роста напряжения на излучателе, задаваемая программой –  $7\text{ V/c}$ , температура жидкости –  $21\pm 1,5^\circ\text{C}$

На рисунке 1 приведены результаты одновременной регистрации выходного сигнала фотоумножителя L (верхняя зависимость) и выходного сигнала гидрофона H (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 H, 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 значе-

нию и затем начинает уменьшаться. В последнем режиме визуально наблюдается образование больших стабильных пузырьков.

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 интенсивности ультразвука. Отметим, что до сих пор в литературе обсуждалось в основном только два режима озвучивания: докавитационный и кавитационный [4].



**Рисунок 2** - Спектры акустического сигнала для различных стадий развития кавитационной области: а - 1я, б - вторая, г - третья, д – четвертая стадии развития кавитационной области. Период следования импульсов ультразвука  $T=100\text{ms}$ , длительность импульсов ультразвука  $\tau = 3\text{ms}$ . Температура жидкости при регистрации спектров -  $21\pm 2^\circ\text{C}$ . Маркером отмечена основная частота -  $f_0 = 720\text{ кГц}$ , штриховой линией показан уровень широкополосного шума – WBN (wide band noise).

На рисунке 2 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

ся 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 гармоник  $3f_0$ ,  $4f_0$  и более высоких (рис. 2b) 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. 2с). На четвертой стадии существенно увеличивается интенсивность субгармоники  $f_0/2$  (рис. 2d), 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 [5], 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Триестского университета (Италия), Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований.

#### *Литература*

1. **Ahmadi F. et.al.** Bio-effects and safety of low-intensity, low-frequency ultrasonic exposure // Progress in Biophysics and Molecular Biology. V.108, 2012.- P. 119-138.
2. **Mason T.J.** Therapeutic ultrasound: an overview // Ultrasonics Sonochemistry, 2011.- P. 847-852.
3. **Дежкунов Н.В.** Влияние импульсного модулирования ультразвукового поля на динамику развития кавитационной области и активность кавитации / А.В. Котухов, В.А. Столер, В.А. Колтович, А.Л. Николаев // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2012 №2. – С. 92-98
4. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008. – 271 с.
5. **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.