

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОГО ШУМА В ГЕЛЕВЫХ ИМИТАТАХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

А.В. КОТУХОВ, М.П. ФЕДОРИНЧИК, Н.В. ДЕЖКУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
dny@bsuir.by*

В последние годы область применения мощного высокочастотного ультразвука в медицине и биологии интенсивно расширяется. Как показано многими авторами, в большинстве таких применений кавитация является ключевым фактором [1-3]. Однако надежных методов детектирования кавитации в биологических структурах до сих пор не создано. В данной работе исследовалась возможность оценки уровня активности кавитации в гелевых имитатах биологических структур и биологических тканях на основании спектрального анализа кавитационного шума.

Ключевые слова: кавитация, интенсивность ультразвука, биологические структуры, гелевые имитаты.

В данной работе для исследований использовалась установка детально описана в работах [4,5]. Рабочая емкость представляет собой цилиндр из нержавеющей стали. Пьезокерамический фокусирующий излучатель вмонтирован через отверстие в днище емкости с помощью тефлоновой крышки, навинчиваемой на емкость. На уровне фокального пятна излучателя в боковой поверхности емкости выполнено окно, в котором установлен фотоумножитель Phillips XP1110 со световодом.

Гидрофон вмонтирован через крышку ёмкости таким образом, что его приемный пьезокерамический элемент находится за фокальным пятном излучателя. Выходные сигналы фотоумножителя и гидрофона (после предварительного усиления) подавались на осциллограф Hewlett Packard 54601A. Для записи спектров акустического сигнала, принимаемого гидрофоном, использовался анализатор спектра Hewlett Packard E4411B.

В результате проведенных исследований впервые выделено 4 стадии развития кавитационной области в гелевых имитатах биологических структур: 1 - возникновение пузырьков и их пульсации без генерирования звуколюминесценции (ЗЛ); 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.

При интенсивности ультразвука ниже порога кавитации в спектре представлена только основная частота f_0 . Гармоника $2f_0$ появляется до возникновения ЗЛ. 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 объёмная концентрация пузырьков в фокальной области излучателя при этом незначительна и что характер их пульсаций мало отличается от линейных. Появление в спектре акустического сигнала гармоник $3f_0$, $4f_0$ и более высоких 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 $n=2, 3, 4\dots$. При интенсивности ультразвука выше порога ЗЛ, т.е. на 3-й 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.

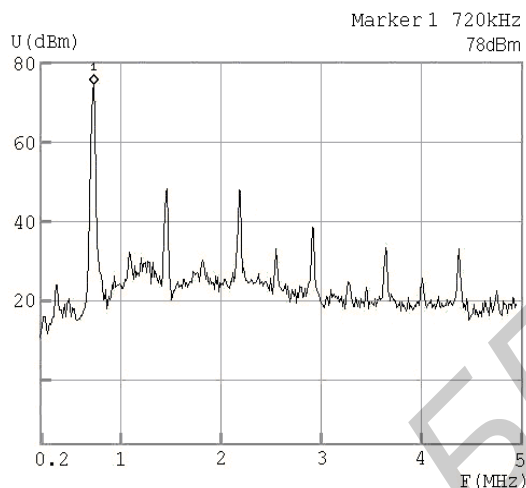


Рис. 1. Спектр кавитационного шума при интенсивности ультразвука $I = 5I_{\text{пор}}$, где $I_{\text{пор}}$ – пороговая интенсивность ультразвука, при которой возникает кавитация

На рис. 1 приведен характерный спектр кавитационного шума для 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, что позволяет их надежно идентифицировать.

В литературе имеются сведения о широком спектре биологических эффектов в акустических полях в кавитационном и докавитационном режимах: 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. Возможно, что каждая из выделенных выше четырех стадий развития кавитационной области как раз и соответствуют данным типам воздействия мощного ультразвука на жизнедеятельность клеток.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Гаврилов Л.Р. // Акустический журнал. 2010. Т. 56, №6. С. 844-861.
2. Mason T.J. // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. V. 18. P. 847-852.
3. Zhou Y., Yang K., Cui J. et. al // Journ. Controlled Release. 2012. V. 157, №1. P. 103–111.
4. Дежкунов Н.В., Котухов А.В., Столер В.А. и др. // Доклады БГУИР. 2012. №2. С. 92-98.
5. Дежкунов Н.В. // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т 34, №8. С. 59-67