

10

Эволюция кавитационной области в фокусированном ультразвуковом поле

© Н.В. Дежкунов, А. Francescutto, F. Calligaris, А.Л. Николаев

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск, Беларусь
Триестский университет, Италия
Московский государственный университет, Россия
E-mail: dnv@bsuir.by

Поступило в Редакцию 1 апреля 2014 г.

Исследовалось генерирование звуколюминесценции и кавитационного шума в поле фокусирующего излучателя при плавном увеличении напряжения на излучателе. Одновременно со звуколюминесценцией записывались выходной сигнал гидрофона, расположенного за фокальной областью излучателя, и спектры кавитационного шума. Выделено 4 стадии развития кавитационной области, различающиеся характером зависимостей регистрировавшихся величин от приложенного к излучателю напряжения. Установлены спектральные признаки кавитационного шума, характерные для каждой из стадий развития кавитационной области.

В последние годы интенсивно расширяются исследования воздействия мощного и, в частности, фокусированного ультразвука на процессы в биологических структурах [1–7]. Полученные результаты позволяют считать, что многие эффекты, как, например, повышение проникающей способности лекарств через мембраны клеток — сонопорация [2,3], подавление роста опухолевых клеток [4,5], усиление действия лекарств [4,6] или выделение лекарств из носителей [7], имеют кавитационную природу, т.е. связаны с явлением образования, роста, пульсаций и захлопывания микропузырьков в жидкости [8]. Авторами [9] обсуждалась возможность использования фокусированного ультразвука в кавитационном режиме, а также и в звукохимии.

Однако закономерности развития кавитационной области в поле фокусирующего излучателя изучены недостаточно, не разработаны методы оценки состояния кавитационной области и методы измерения активности кавитации, что существенно ограничивает возможности применения фокусированного ультразвука.

В данной работе впервые выделено 4 стадии развития кавитационной области, отличающиеся характеристиками кавитационных эффектов — звуколюминесценции (ЗЛ), кавитационного шума и поглощения ультразвука в кавитационной области.

Детальное описание использовавшейся установки и методики приведено в работах [10,11]. Рабочая емкость представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 100 mm и высотой 160 mm. Пьезокерамический фокусирующий излучатель диаметром 65 mm и фокусным расстоянием 100 mm вмонтирован в днище емкости. Резонансная частота пьезоэлемента $f_0 = 720$ kHz. Торец емкости, противоположный излучателю, снабжен конической крышкой с конусом вовнутрь емкости. Гидрофон вмонтирован через крышку емкости таким образом, что его приемный пьезокерамический элемент диаметром 2 mm и толщиной 0.25 mm находится за фокальным пятном излучателя на расстоянии 25 mm от него. На уровне фокального пятна излучателя в боковой поверхности емкости выполнено окно, в котором установлен фотоумножитель PhillipsXP1110 со световодом диаметром 20 mm.

Для питания излучателя использовался управляемый компьютером генератор УЗГ-08-01 (БГУИР), оснащенный системой автоматического поддержания резонансной частоты (АПЧ). Максимальная выходная мощность генератора 70 W достигается при амплитудном напряжении на излучателе 275 V. Методика проведения экспериментов состояла в следующем. Ячейка заполнялась дистиллированной водой и отстаивалась в течение 2 суток. Затем жидкость дегазировали под действием ультразвука в течение 20 min при напряжении на излучателе 170 V (≈ 10 W/cm²). Предварительная частичная дегазация жидкости существенно повышает воспроизводимость результатов [10]. После дегазации емкость закрывали герметично крышкой конусом вовнутрь. 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.

На рис. 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. Генератор включался на 5-й секунде после начала эксперимента. На первом этапе, как видно из

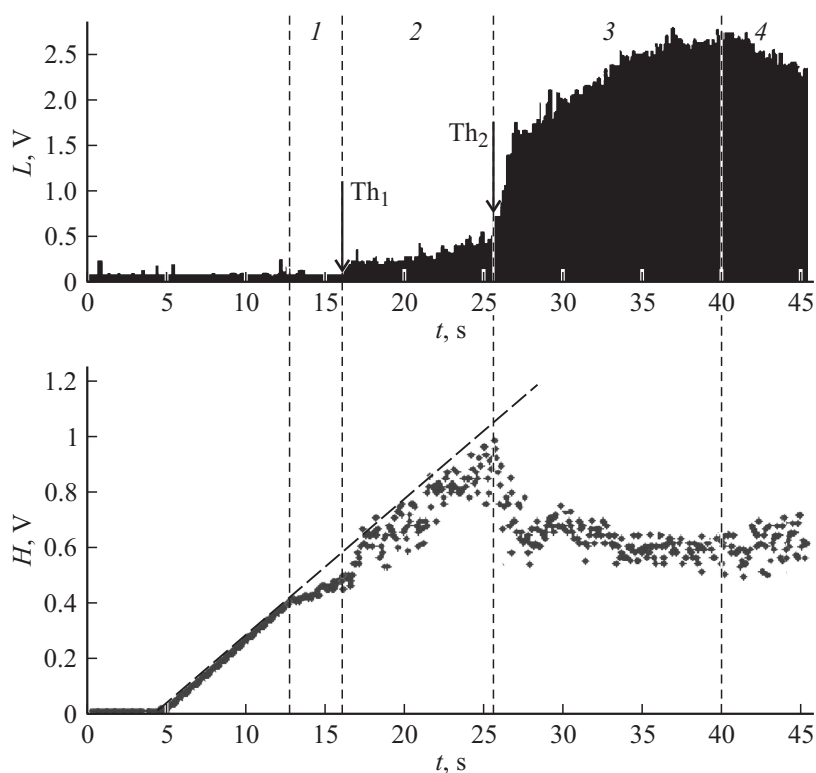


Рис. 1. Результаты одновременной регистрации выходных сигналов фотоумножителя L и гидрофона H в импульсном фокусированном ультразвуковом поле при плавном увеличении напряжения на излучателе. Период следования импульсов ультразвука $T = 100$ ms, длительность импульсов ультразвука $\tau = 3$ ms. Вертикальными штриховыми линиями отделены различные стадии развития кавитационной области. Скорость роста напряжения на излучателе, задаваемая программно, 7 V/s, температура жидкости $21 \pm 1.5^\circ\text{C}$.

нижнего графика, выходной сигнал гидрофона увеличивается линейно со временем. Незадолго до возникновения ЗЛ, примерно на 13-й секунде после начала эксперимента, отмечено отклонение выходного сигнала гидрофона от первоначальной прямой в сторону уменьшения наклона

зависимости $H(t)$, что указывает на увеличение поглощения энергии ультразвука, очевидно, вследствие возникновения пузырьков в фокальной области излучателя.

Свечение с интенсивностью выше уровня фоновых помех в приведенном на рис. 1 примере возникает примерно на 17-й секунде после начала эксперимента. Этот момент отмечен стрелкой Th_1 — 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 Th_2 — второй порог ЗЛ. Быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождается соответствующим быстрым падением выходного сигнала гидрофона H .

Полный акустический сигнал H является результатом суммирования исходного ультразвукового поля и акустической эмиссии, генерируемой кавитационными пузырьками, — кавитационного шума. Стабильно пульсирующие полости и коллапсирующие пузырьки снижают акустическую прозрачность фокальной зоны, особенно в стадии роста, что может быть причиной экранирования поля и уменьшения интенсивности выходного сигнала гидрофона — точки ниже средней линии $H(t)$ на рис. 1. Захлопывающимися полостями генерируются ударные волны, которые могут быть причиной импульсов повышенной интенсивности — точки выше средней линии $H(t)$. Быстрое увеличение поглощения ультразвука в этом режиме связано, по-видимому, с началом размножения кавитационных пузырьков по механизму цепной реакции, описанному в работе [8]. После быстрого роста интенсивность ЗЛ стремится к некоторому предельному значению 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

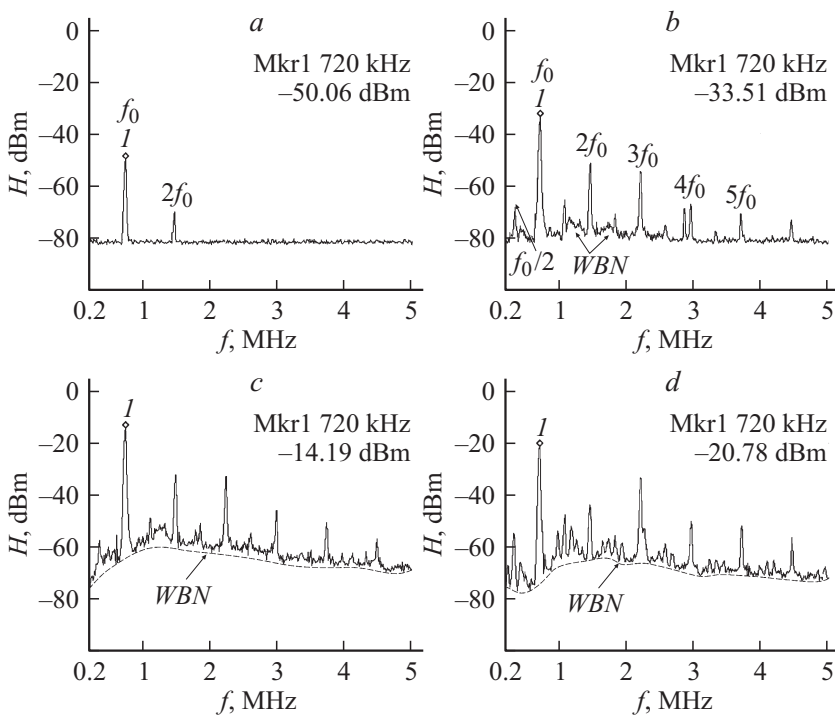


Рис. 2. Спектры акустического сигнала для различных стадий развития кавитационной области: *a* — первая, *b* — вторая, *c* — третья, *d* — четвертая стадии развития кавитационной области. Период следования импульсов ультразвука $T = 100$ ms, длительность импульсов ультразвука $\tau = 3$ ms. Температура жидкости при регистрации спектров $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Маркером отмечена основная частота $f_0 = 720$ kHz, штриховой линией показан уровень широкополосного шума — WBN (wide band noise).

кавитационной области, в котором интенсивность ЗЛ уменьшается с ростом интенсивности ультразвука. Отметим, что до сих пор в литературе обсуждалось в основном только 2 режима озвучивания: докавитационный и кавитационный [8,12].

На рис. 2 приведены спектры кавитационного шума для различных интенсивностей ультразвука, соответствующих описанным выше стади-

ям 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. 2, *a*). 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.

Появление в спектре акустического сигнала гармоник $3f_0$, $4f_0$ и более высоких (рис. 2, *b*) 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. 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. 2, *c*). 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. 2, *d*), 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. Если в соответствии с [13,14] считать, что субгармоника возникает вследствие пульсаций пузырьков, имеющих размеры больше резонансного, то увеличение ее интенсивности на стадии 4 развития кавитационной области может быть интерпретировано как увеличение концентрации полостей с большими размерами или увеличение размеров кавитационного кластера (кластеров). Увеличение объемной концентрации пузырьков в кавитационной области выше

некоторой оптимальной и образование больших полостей — 2 фактора, способствующих снижению эффективности преобразования и концентрации энергии ультразвука при их захлопывании [11], что и приводит к уменьшению интенсивности ЗЛ на стадии 4 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.

Список литературы

- [1] *Гаврилов Л.Р.* // Акуст. журн. 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., Ye J.Y., Deng C.X.* // J. Controlled Release. 2012. V. 157. N 1. P. 103–111.
- [4] *Николаев А.Л., Гопин А.В., Божевольнов В.Е., Трещалина Е.М., Андронова Н.В., Мелихов И.В.* // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 4–5. С. 565–574.
- [5] *Shehata I.A.* // European J. Radiology. 2012. V. 81. N 3. P. 534–541.
- [6] *Serpe L., Canaparo R., Berta L., Bargonni A., Zara G.P., Frairia R. et al.* // Technol. Cancer Res. Treat. 2011. V. 10. N 1. P. 85–93.
- [7] *Pitt W.G., Hussein G.A., Staples B.J.* // Expert Opinion on Drug Delivery. 2004. V. 1. P. 37–56.
- [8] *Сиротюк М.Г.* Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 271 с.
- [9] *Hallez L., Touyeras F., Hihn J.-Y., Klima J., Guey J.-L., Spajer M., Bailly Y.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2010. V. 50. P. 310–317.
- [10] *Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P., Mason T.J., Iernetti G., Kulak A.I.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2000. V. 7. P. 19–24.
- [11] *Дежжунов Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 8. С. 59–67.
- [12] *Hauptmann M., Struyf H., Mertens P., Heyns M., De Gendt S., Glorieux C., Brems S.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. V. 20. P. 77–88.
- [13] *Lauterborn W.* // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 59. P. 283–293.
- [14] *Leighton T.G.* The Acoustic Bubble. London: Academic Press, 1994. 460 p.