

03;08;12

Звуколюминесценция при взаимодействии двух сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей

© Н.В. Дежкунов

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск
E-mail: dnv@bsuir.edu.by

Поступило в Редакцию 22 января 2001 г.

Исследовалось генерирование свечения в жидкости под действием ультразвука (звуколюминесценция) в поле фокусирующего высокочастотного (880 kHz) излучателя при одновременном или предварительном воздействии на жидкость низкочастотным ультразвуком (19.9 kHz). Показано, что сверхаддитивное усиление звуколюминесценции имеет место не только при одновременной работе излучателей, но и в течение длительного промежутка времени (до нескольких часов) после отключения низкочастотного излучателя, т. е. обнаружен эффект длительного последствия низкочастотных ультразвуковых колебаний на интенсивность звуколюминесценции, генерируемой под действием высокочастотных колебаний. Рассмотрены возможные механизмы обнаруженных закономерностей.

Известно, что эффективность концентрации энергии одиночным кавитационным пузырьком значительно выше, чем пузырьками в составе многопузырьковой кавитационной области [1–3]. Это, в частности, выражается в большей интенсивности вспышек звуколюминесценции (ЗЛ), больших температурах и давлениях, достигаемых при захлопывании пузырька. Например, число фотонов в каждой вспышке в условиях однопузырьковой звуколюминесценции достигает 10^5 – 10^6 [1], в то время как число фотонов во вспышке в условиях многопузырьковой звуколюминесценции не превышает 10^3 [4,5]. Оценки температуры, до которой разогревается парогазовая смесь внутри пузырька, дают значения 2000–6000 К для многопузырьковой ЗЛ [2,3,5] и 30 000–50 000 К или даже больше для однопузырьковой [1,6]. Основной причиной таких различий является, по-видимому, потеря сферической формы пузырьков при их захлопывании, что может приводить к уменьшению

степени сжатия парогазовой смеси внутри них и соответствующему уменьшению достигаемых при этом температур и давлений. Отклонения от сферической формы могут инициироваться в многопузырьковой кавитационной области в результате межпузырьковых взаимодействий посредством ударных волн и гидродинамических сил. Особенно сильно взаимодействуют пузырьки в составе устойчивых образований — кластеров и стримеров [7,8]. Другими факторами, снижающими активность кавитации, является неоднородность распределения пузырьков по размерам и экранирование внутреннего объема кавитационной области периферийными пузырьками [9,10]. При этом большие неэффективные пузырьки поглощают и рассеивают значительную долю акустической энергии, снижая тем самым энергию, которая могла бы быть затрачена на образование эффективно кавитирующих полостей и запасена ими в фазе растяжения.

В данной работе предложен новый метод повышения интенсивности многопузырьковой звуколюминесценции, заключающийся в том, что на кавитационную область, генерируемую высокочастотным (ВЧ) импульсно-модулированным звуковым полем (τ — длительность импульсов, T — период их следования), накладывается дополнительно низкочастотное (НЧ) поле.

Схема измерений представлена на рис. 1, а. Высокочастотный (ВЧ) фокусирующий излучатель диаметром 40 мм и частотой 880 кГц установлен в днище емкости. Диаметр емкости — 100 мм, высота — 180 мм. Через боковые окна на уровне фокального пятна ВЧ излучателя в емкость введены световод фотоумножителя диаметром 20 мм и волновод низкочастотного (НЧ) излучателя. Диаметр излучающей поверхности НЧ волновода равен 15 мм, его поверхность находится на расстоянии 30 мм сбоку от центра фокального пятна ВЧ излучателя. Гидрофон расположен на расстоянии 30 мм над фокальным пятном ВЧ излучателя. Эксперименты выполнялись с использованием дважды дистиллированной воды при температуре $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Основной особенностью методики является предварительная дегазация жидкости под действием ультразвука в течение 15 мин, существенно повышающая воспроизводимость измерений. В результате такой обработки газосодержание жидкости уменьшается на 20–25% по сравнению с состоянием насыщения [10,11] и затем уже мало меняется под действием ультразвука в ходе экспериментов.

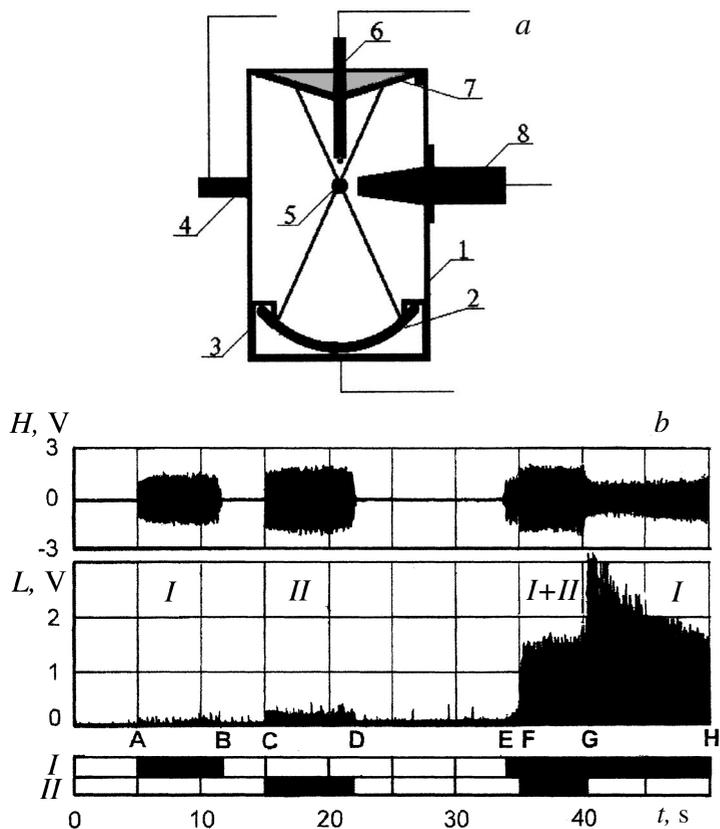


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной ячейки: 1 — корпус ячейки, 2 — высокочастотный (880 kHz) фокусирующий излучатель, 3 — тefлоновый держатель, 4 — фотоумножитель, 5 — фокальное пятно ВЧ излучателя, 6 — гидрофон, 7 — крышка из звукопоглощающего материала, 8 — низкочастотный излучатель (19.9 kHz) волноводом-концентратором; *b* — результаты одновременной регистрации выходных сигналов гидрофона *H* (верхняя осциллограмма) и фотоумножителя *L* (нижняя осциллограмма). Длительность импульсов τ ВЧ поля (I) — 2 ms, период следования импульсов T — 300 ms, напряжение на излучателе — 135 V. Амплитуда колебаний НЧ (II) излучателя — $8 \mu\text{m}$, время работы ВЧ (I) и НЧ (II) излучателей отмечено в нижней части рисунков закрашенными участками соответственно верхней и нижней полос.

Измерялась интенсивность ЗЛ при возбуждении кавитации отдельно ВЧ и НЧ полями, при совместном действии ВЧ и НЧ полей и после отключения НЧ поля. На рис. 1, *b* представлен пример регистрации выходного сигнала H гидрофона (верхняя осциллограмма) и сигнала фотоумножителя L (нижняя осциллограмма). Во временном интервале АВ работает ВЧ излучатель. Средняя величина сигнала L при этом составляет ≈ 17 мВ. Отметим, что при медленной развертке (как на рис. 1) низкоинтенсивная ЗЛ может маскироваться фоновыми импульсами. Эти импульсы довольно редки, поэтому при большой скорости развертки они практически не затрудняют измерений. Во временном интервале ВС оба излучателя отключены. На участке CD работает НЧ излучатель. Величина L при этом составляет примерно 250–270 мВ. На участке DE оба излучателя отключены. На участке EF снова включается ВЧ излучатель, а на участке FG — также и НЧ излучатель, который затем отключается (точка G на временной оси) и на участке GH работает только ВЧ излучатель. Таким образом, на участке FG зарегистрирована интенсивность ЗЛ при взаимодействии двух полей, а на участке GH — интенсивность ЗЛ, генерируемой ВЧ полем после того, как НЧ поле отключено. Усредненная величина L на участке FG составляет около 1500 мВ. Таким образом, результат совместного действия двух полей в несколько раз превосходит сумму результатов действия каждого из них в отдельности, т.е. имеет место существенно неаддитивное сложение эффектов. Однако наиболее интересно, что после отключения НЧ поля (точка G) интенсивность ЗЛ скачком возрастает до значительно больших величин и лишь после этого медленно уменьшается, стремясь к некоторому предельному значению (интервал GH). При обратной последовательности включения ВЧ и НЧ полей (на рисунке не показано) второго скачка L не наблюдается, а в момент отключения ВЧ поля интенсивность ЗЛ практически мгновенно уменьшается до исходного значения, генерируемого отдельно НЧ полем.

На рис. 2 приведены результаты регистрации ЗЛ при проведении эксперимента по другой схеме, а именно: вначале на короткий промежуток времени включалось НЧ поле, затем через некоторое время Δt включалось ВЧ поле. Режимы работы НЧ и ВЧ излучателей поддерживались такими же, как и для условий эксперимента, представленного на рис. 1, *b*. Видно, что память о стимулирующем действии НЧ поля на активность кавитации, генерируемой ВЧ полем, сохраняется достаточно долго. При включении ВЧ излучателя после предварительного

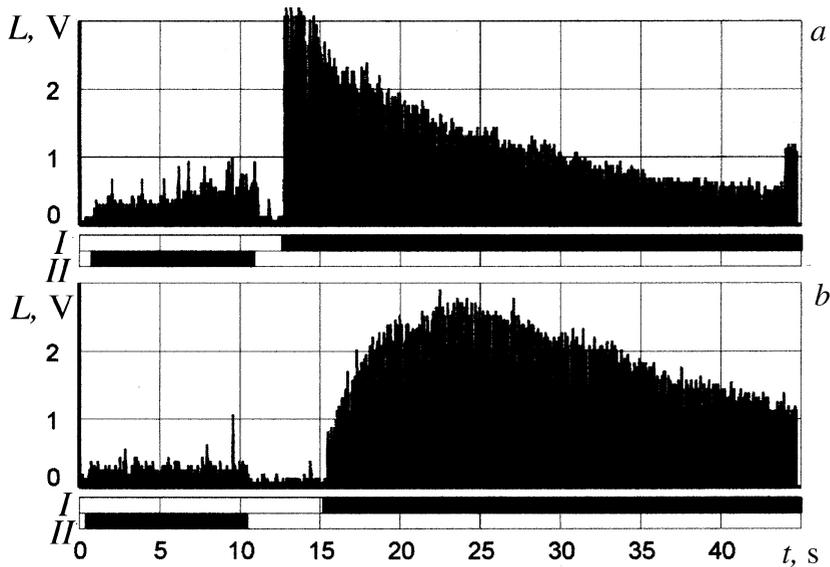


Рис. 2. Зависимость L от времени t при раздельном включении НЧ (II) и ВЧ (I) полей для различных интервалов времени Δt : $\Delta t = 1.5$ (a), 5 (b), 15 (c) и 25 (d) s. Остальные параметры — те же, что и для условий эксперимента на рис. 1.

озвучивания НЧ полей интенсивность ЗЛ увеличивается, достигает некоторого максимального значения L_{\max} (рис. 2, a–d) и затем медленно уменьшается. По мере увеличения промежутка времени Δt L_{\max} уменьшается, что обусловлено релаксацией изменений кавитационных свойств жидкости, вызванных воздействием НЧ поля. Время полной релаксации, т. е. временной масштаб памяти в кавитационной области, в некоторых случаях достигает нескольких часов. За это время жидкость возвращается в исходное состояние и интенсивность ЗЛ при включении ВЧ поля практически равна интенсивности ЗЛ до воздействия НЧ полей.

Очевидный механизм усиления ЗЛ при одновременной работе двух излучателей — это увеличение передаваемой в жидкость мощности и интерференция полей, в результате чего могут возникать большие переменные давления, чем в каждом из полей в отдельности. При

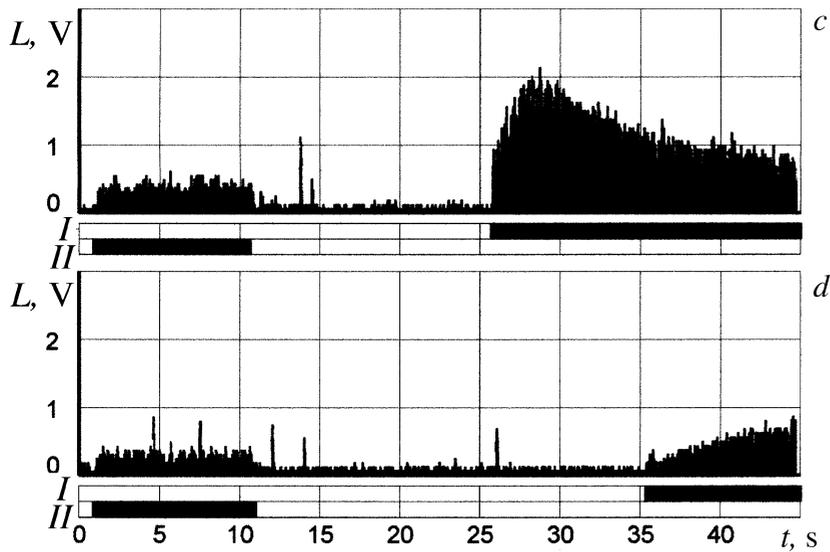


Рис. 2 (продолжение).

этом возможно увеличение числа кавитационных событий в единицу времени и соответствующее увеличение интенсивности ЗЛ. Результат сложения двух полей с частотами f_1 и f_2 в пузырьковой жидкости, кроме того, включает комбинационные частоты $f_1 + f_2$ и $f_1 - f_2$, а также комбинационные частоты гармоник nf_1 и nf_2 . Таким образом, спектральный состав результирующего поля значительно расширяется, что может способствовать вовлечению в кавитационный процесс более широкого диапазона размеров пузырьков. Другой механизм заключается в следующем. Низкочастотное поле является квазистатическим по отношению к высокочастотному. В полупериод разрежения НЧ поля результирующее давление, квазистатическое по отношению к ВЧ полю, уменьшается. В результате размеры кавитационных зародышей увеличиваются. Поэтому увеличивается и число пузырьков, кавитирующих под действием ВЧ поля, что в итоге может приводить к увеличению интенсивности ЗЛ. В фазе сжатия НЧ волны повышенное статическое давление способствует более быстрому схлопыванию этих

пузырьков. Однако, как следует из данных, представленных на рис. 1 и 2, эти механизмы не являются превалирующими. Действительно, их проявление возможно только, когда оба поля включены. В то же время в момент отключения НЧ излучателя наблюдается еще больший рост интенсивности ЗЛ. Данными факторами, кроме того, не объясняется наличие эффекта длительного последствия НЧ поля (рис. 2).

Возможным механизмом усиления ЗЛ является генерирование нестабильных зародышей кавитации при захлопывании кавитационных пузырьков. Действительно, в соответствии с [12] пузырек при захлопывании может распадаться на значительное количество мелких осколков (до 40) с размерами, намного меньшими размеров исходного зародыша. Поэтому фрагменты пузырьков, захлопывающихся под действием НЧ поля, могут оказаться подходящими зародышами для кавитации в ВЧ поле. В результате число кавитирующих пузырьков значительно увеличивается, что и приводит к увеличению интенсивности ЗЛ. После отключения НЧ поля эти зародыши растворяются, уменьшаясь в размерах, интенсивность ЗЛ при этом также уменьшается.

Таким образом, стимулирование кавитации, генерируемой ВЧ полем, с помощью кратковременного предварительного или одновременного воздействия на жидкость ультразвуковым НЧ полем позволяет существенно увеличить интенсивность ЗЛ. Для выяснения роли упомянутых механизмов в эффекте усиления ЗЛ при взаимодействии двух ультразвуковых полей, установления причины скачка интенсивности ЗЛ в момент отключения НЧ поля и медленной релаксации кавитационных свойств жидкости планируется проведение дополнительных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Европейской программы INCO-Copernicus, проект PL 97–8045.

Список литературы

- [1] *Hiller R., Putterman S.J., Barber B.P.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. N 8. P. 1182–1184.
- [2] *Matula T.J., Roy R.A., Mourad P.D.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 13. P. 2602–2605.
- [3] *Suslick K.S., McNamara III, Didenko Y.* // Proc. NATO Adv. Study Inst. Sonochemistry & Sonoluminescence. Boston: Kluwer Publ., 1998.

- [4] *Gimenez G.J.* // *Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 71. N 4. P. 839–846.
- [5] *Didenko Yu.T., Nastich D.N., Pugach S.P.* et al. // *Ultrasonics.* 1994. V. 32. P. 71–76.
- [6] *Bernstein L.S., Zakin M.R.* // *J. Phys. Chem.* 1995. V. 99. P. 14619–14626.
- [7] *Parlitz U., Luther S., Mettin R.* et al. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 1999. V. 357. P. 313–334.
- [8] *Doinikov A.A., Zavtrak S.T.* // *J. Acoust. Soc. Am.* 1996. V. 99. P. 3849–3851.
- [9] *Leighton T.G.* *The Acoustic Bubble.* London: Academic Press. 1996. 604 P.
- [10] *Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P.* et al. // *Ultrasonics Sonochemistry.* 2000. V. 7. P. 19–24.
- [11] *Дежкунов Н.В.* // *Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* 1998. № 1. С. 109–114.
- [12] *Сиротюк М.Г.* // *Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга.* М.: Наука, 1968. С. 167–220.