

03.1;10.1

Наблюдение кавитационного шума без субгармоники

© А.В. Котухов¹, Д.В. Ефремов², И.А. Банникова², Ю.В. Баяндин², С.В. Уваров², О.Б. Наймарк²,
Н.А. Жарко¹, Н.В. Дежунов¹

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: usv@icmm.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 13 января 2023 г.

Принято к публикации 13 января 2023 г.

Исследовалась эволюция спектров кавитационного шума в ультразвуковом поле, генерируемом фокусирующим преобразователем при увеличении интенсивности ультразвука. Впервые зарегистрированы спектры без субгармоники $f_0/2$, где f_0 — частота звукового поля, генерирующего кавитацию. Такой спектр наблюдается в частично дегазированной воде при большой скважности ультразвуковых импульсов. В режиме непрерывного генерирования ультразвука порог возникновения сонолюминесценции с точностью не ниже точности измерений совпадает с порогом появления частоты $f_0/2$ в спектре кавитационного шума. В импульсном поле при интенсивности ультразвука намного выше порога кавитации интенсивность сонолюминесценции растет с ростом скважности импульсов, а интенсивность линии $f_0/2$ в спектре кавитационного шума уменьшается.

Ключевые слова: ультразвук, кавитационный шум, субгармоника, сонолюминесценция.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54816.19455

Кавитация представляет собой явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости. Анализ коллапса микропузырьков впервые был дан Рэлеем [1]. Экспериментально наблюдаемые эффекты при коллапсе пузырьков сопровождаются акустическими сигналами (кавитационный шум), химическими реакциями и излучением света. Световая эмиссия была впервые исследована в жидкостях, кавитированных ультразвуком (УЗ) [2], и обычно называется сонолюминесценцией (СЛ) или звуколюминесценцией. Акустический метод получил развитие при исследовании пузырьковой СЛ в связи со свойствами излучаемого света [3]. В то время как теоретические модели сосредоточены на динамике одиночных микропузырьков, экспериментальные исследования ориентированы на изучение многопузырьковой СЛ. Отмечается различие гидродинамической кавитации в интенсивных сдвиговых потоках [4] и акустически индуцированной СЛ, когда пузырьки генерируют СЛ в течение многих циклов в условиях проявления кавитационной памяти [5]. При пульсациях и захлопывании полостей в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал — кавитационный шум (КШ). Поскольку кавитационный шум излучается пузырьками при их движении, то, как обоснованно считают многие авторы [6–8], он содержит информацию о состоянии кавитационной области и динамическом поведении пузырьков. Поэтому спектральный анализ КШ может служить эффективным методом исследования кавитации. В режиме развитой кавитации, т.е. при интенсивности УЗ значительно выше порога кавитации, спектр КШ включает основную частоту f_0 ультразвукового поля, генерирующего кавитацию, гармоники nf_0 (где n —

целое число), субгармонику $f_0/2$, частоты $(2n + 1)f_0/2$ и непрерывную составляющую белого шума. Разработка методов исследования кавитации с использованием КШ затрудняется тем, что механизмы генерирования спектральных компонент КШ не выяснены в полной мере [8]. Согласно [9], наличие субгармоники $f_0/2$ в акустическом сигнале обусловлено пульсацией пузырьков с размерами в 2 раза больше резонансного. Альтернативные механизмы возникновения компоненты $f_0/2$ связаны с возбуждением стоячих волн на поверхности пузырей большого размера [10] и пульсациями кавитационной области как целого вблизи излучателя с частотой f_0/m [11]. Авторами [12] предложено использовать субгармонику $f_0/2$ для детектирования кавитации и оценки уровня ее активности.

В настоящей работе впервые зарегистрированы спектры КШ без субгармоники $f_0/2$. Показано, что в импульсном ультразвуковом поле наблюдается отрицательная корреляция интенсивности субгармоники и СЛ при увеличении скважности импульсов. Детальное описание установки и методики приведено в [13]. Рабочая емкость выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали с полыми водоохлаждаемыми стенками с внутренним диаметром 100 мм и высотой 180 мм. Фокусирующий пьезокерамический излучатель ультразвука диаметром 65 мм с фокусным расстоянием 60 мм установлен в днище емкости. Резонансная частота пьезоэлемента $f_0 = 720$ kHz. Гидрофон вмонтирован через крышку емкости таким образом, что его приемный пьезокерамический элемент диаметром 2 мм и толщиной 0.25 мм находится за фокальным пятном излучателя на расстоянии 20 мм от него.

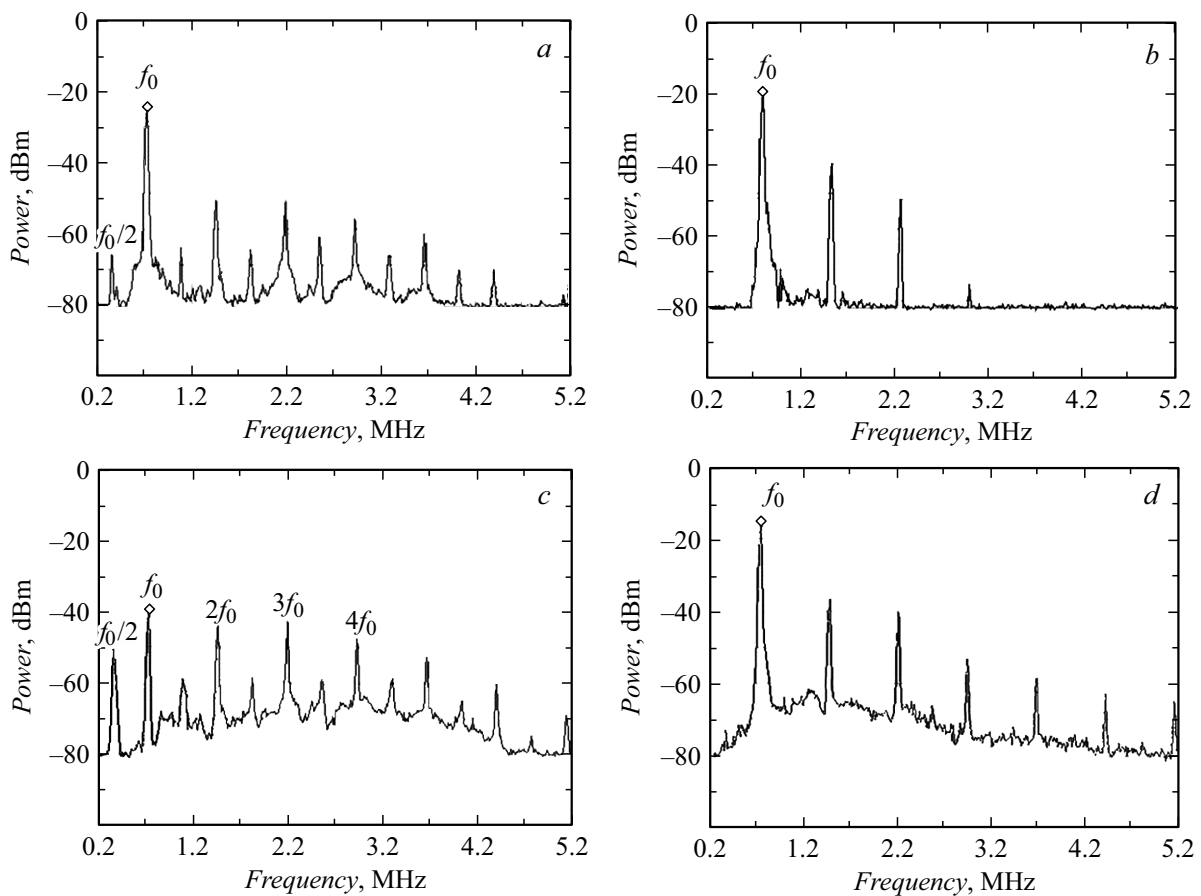


Рис. 1. Эволюция спектров КШ при увеличении напряжения U на излучателе. U , V: a, b — 45, c — 150, d — 175. a, c — в непрерывном ультразвуковом поле, b, d — в импульсном поле при длительности импульсов $\tau = 2$ ms и периоде следования импульсов $T = 200$ ms. Более подробные пояснения приведены в тексте.

На рис. 1 представлены спектры кавитационного шума, полученные при увеличении интенсивности УЗ. Интенсивность УЗ меняли варьированием напряжения U , подаваемого на излучатель. На рис. 1, a, c приведены спектры в непрерывном ультразвуковом поле, жидкость — дистиллированная вода без дополнительной дегазации при температуре $22.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$. На рис. 1, b, d показаны спектры в импульсном поле при длительности импульсов $\tau = 2$ ms и периоде следования импульсов $T = 200$ ms, жидкость — дистиллированная вода при температуре $22.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$, дегазированная кипячением по методике [14]. На рис. 1, c отмечены гармоники nf_0 и субгармоника $f_0/2$. В непрерывном поле все спектральные компоненты КШ ($f_0, f_0/2, nf_0, (2n+1)f_0/2$ и непрерывная составляющая) присутствуют уже при относительно невысоких интенсивностях УЗ (рис. 1, a). Согласно [15], этот режим соответствует второй стадии развития кавитационной области, когда интенсивность УЗ в несколько раз превышает порог СЛ для данных условий. При увеличении интенсивности УЗ ($U = 45\text{--}75$ V) интенсивность всех составляющих КШ растет, кроме частоты f_0 . В этом режиме наблюдается быстрый рост интенсивности СЛ. Установлено,

что в непрерывном поле порог возникновения СЛ с точностью не ниже точности измерений совпадает с порогом появления частоты $f_0/2$ в спектре КШ, что согласуется с результатами работы [16]. При интенсивности УЗ ($U = 150$ V), намного превышающей порог СЛ (рис. 1, c), интенсивность f_0 уменьшается существенно. Это, очевидно, обусловлено увеличением поглощения УЗ в кавитационной области в результате увеличения объемной плотности пузырьков на пути звуковой волны. А поскольку интенсивность СЛ при этом также уменьшается, можно утверждать, что увеличение объемной плотности пузырьков происходит в основном за счет числа пузырьков, имеющих размеры больше резонансного. Такие пузырьки пульсируют, мало меняя свои размеры, и не генерируют свечения, однако эффективно поглощают и рассеивают энергию УЗ. Важным фактором уменьшения интенсивности СЛ при большой плотности пузырьков являются взаимодействия их между собой за счет ударных волн и сил Бьеркнеса. Эти взаимодействия с учетом неустойчивости сферической формы пузырька при захлопывании [17] могут приводить к распаду пузырька на осколки на ранней стадии захлопывания [18], что будет снижать эффективность преобразования и кон-

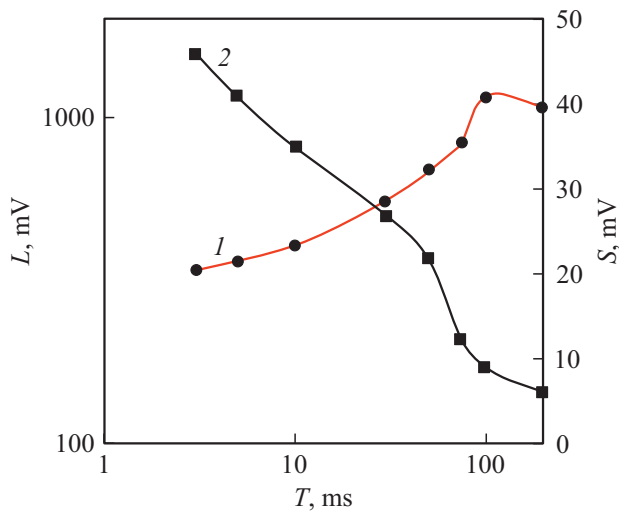


Рис. 2. Зависимости интенсивности СЛ L (1) и субгармоники S (2) от периода следования T импульсов ультразвука ($\tau = 2$ ms, $U = 175$ V).

центрации энергии УЗ. Кроме того, по мере роста концентрации пузырьков увеличивается экранирующее действие периферийной части кавитационной области [18].

Спектральный состав КШ в импульсном поле (рис. 1, *b, d*) отличается от предыдущего случая отсутствием частоты $f_0/2$ и более высоким уровнем сигнала на частотах f_0 и nf_0 . Высокий уровень f_0 означает, что поглощение энергии УЗ в кавитационной области в импульсном поле ниже, чем в непрерывном.

На рис. 2 приведены зависимости от периода следования T импульсов звукового поля выходного сигнала фотомножителя L (кривая 1) и интенсивности субгармоники S (кривая 2). Из представленных данных следует, что в диапазоне изменения $T = 3\text{--}100$ ms наблюдается отрицательная корреляция величин L и S , т.е. интенсивность СЛ увеличивается с ростом T , а интенсивность субгармоники уменьшается. Если в соответствии с гипотезой [9] считать, что генерирование субгармоники в спектре КШ связано с пульсациями пузырьков большого размера, представленные на рис. 2 данные можно объяснить следующим образом. С увеличением скважности импульсов T/τ увеличивается промежуток времени $T - \tau$ между двумя последовательными импульсами. За это время образовавшиеся под действием УЗ зародыши кавитации уменьшают свои размеры за счет диффузии газа из пузырька в жидкость. В результате при больших T и постоянном τ к началу следующего импульса жидкость в значительной степени успевает релаксировать в направлении к исходному состоянию (с концентрацией и размерами зародышей до воздействия УЗ). С уменьшением $T - \tau$ степень релаксации кавитационных свойств жидкости, очевидно, снижается. Как следствие, к началу каждого последующего периода концентрация зародышей кавитации и их размеры будут увеличиваться. Поэтому можно ожидать, что при

уменьшении T и постоянном τ будут увеличиваться концентрация и размеры пузырьков в кавитационной области. В результате вероятность образования больших пузырей, например, за счет коалесценции под действием сил Бьеркнеса [19] и выпрямленной диффузии также будет расти, что приводит к увеличению интенсивности субгармоники при уменьшении T (кривая 2 на рис. 2). С другой стороны, увеличение интенсивности СЛ при увеличении T (кривая 1 на рис. 2) обусловлено повышением эффективности преобразования энергии УЗ в другие виды энергии в результате действия рассмотренных выше факторов [8].

Таким образом, в результате проведенных исследований впервые зарегистрированы спектры КШ без субгармоники $f_0/2$. Такой спектр наблюдается в частично дегазированной воде при большой скважности импульсов ультразвука. Следовательно, эта составляющая в спектре КШ не может использоваться для детектирования кавитации в импульсных ультразвуковых полях. Полученные результаты подтверждают гипотезу о генерировании субгармоники большими кавитационными полостями, имеющими размеры больше резонансного.

Представляет интерес сопоставление результатов исследования спектров СЛ при гидродинамической кавитации, наблюдаемой в интенсивных сдвиговых потоках, когда кавитационное свечение обычно связывается с одним циклом роста и схлопывания полостей, и акустически индуцированной СЛ, где пузырьки могут продолжать производить СЛ в течение многих циклов. Исследование гидродинамической СЛ в потоках, набегающих на наклонную пластину (крыло) при различных углах атаки [20], позволило установить четыре различных режима поведения кавитации. При пологих углах (2°) кавитационные отдельные пузырьки имели полусферическую форму. При увеличении угла атаки до 4° отдельные пузырьки сменялись сплошной областью, которая имела форму листа, прикрепленного к передней кромке пластины. Для углов атаки больше 7° область становилась неустойчивой, что приводило к образованию облаков кавитационных пузырьков. При превышении угла атаки 12° пограничный слой отрывался от передней кромки крыла с формированием полостей, образующихся в ядре вихревых структур, генерируемых в зоне рециркуляции. Было установлено, что для минимального угла атаки интенсивность кавитационной люминесценции усиливалась с увеличением скорости C потока, возмущаемого крылом, и соответствовала степенному закону с показателем степени α в интервале $\alpha = 3.9\text{--}7.2$. Аналогичное степенное поведение было установлено для интенсивности акустического шума, создаваемого кавитацией с показателем степени для скорости C в интервале $\alpha = 4.8\text{--}5.9$. Измерения скорости эрозии (определяемой путем подсчета ямок на пластине-крыле) указывали на то, что она была пропорциональна интенсивности свечения. Установлено, что, когда (полусферические) пузырьки остаются на поверхности пластины, пузырьковая кавитация сопровождается высокой скоростью

питтинга. Эти результаты позволили предположить [21], что данные люминесценции, шума и эрозии являются коррелированными, если они относятся к одному и тому же режиму кавитации. В связи с этим представляет интерес анализ данных регистрации кавитационного шума и сонолюминесценции в зависимости от интенсивности УЗ при варьировании скважности импульсов T/τ в терминах показателей экспонент. Это позволит сопоставить механизмы СЛ в УЗ и гидродинамических полях, связав их с закономерностями кавитационной памяти.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта „Механизмы переноса импульса и диссипации в конденсированных средах (жидкостях и твердых телах) при интенсивных воздействиях в условиях множественных метастабильных состояний, индуцированных дефектами“ (соглашение С-26/562 от 23 марта 2021 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Rayleigh, *Phil. Mag.*, Ser. 6, **34** (200), 94 (1917). DOI: 10.1080/14786440808635681
- [2] H. Frenzel, *Z. Phys. Chem. B*, **27**, 421 (1934). DOI: 10.1515/zpch-1934-0137
- [3] B.P. Barber, R.A. Hiller, R. Löfstedt, S.J. Putterman, *Phys. Rep.*, **281**, 65 (1997). DOI: 10.1016/S0370-1573(96)00050-6
- [4] M. Farhat, A. Chakravarty, J.E. Field, *Proc. R. Soc. A*, **467** (2126), 591 (2011). DOI: 10.1098/rspa.2010.0134
- [5] O. Yavas, P. Leiderer, H.K. Park, C.P. Grigoropoulos, C.C. Poon, A.C. Tam, *Phys. Rev. Lett.*, **72** (13), 2021 (1994). DOI: 10.1103/PhysRevLett.72.2021
- [6] С.П. Скворцов, Н.С. Масленков, В.И. Нечаев, А.П. Кравченко, *Мед. техника*, № 5, 38 (2019). <http://www.mtjournal.ru/archive/2019/meditsinskaya-tekhnika-5/kontrol-parametrov-kavitatsii-v-ultrazvukovoy-khirurgii>
- [7] O. Kwon, K.J. Pakk, M.J. Choi, *J. Acoust. Soc. Am.*, **149** (6), 4477 (2021). DOI: 10.1121/10.0005136
- [8] N.V. Dezhkunov, A. Francescutto, L. Serpe, R. Canararo, G. Cravotto, *Ultrason. Sonochem.*, **40** (Pt B), 104 (2018). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004
- [9] A. Eller, H.G. Flynn, *J. Acoust. Soc. Am.*, **46** (3), 722 (1969). DOI: 10.1121/1.1911753
- [10] D.G. Ramble, A.D. Phelps, T.G. Leighton, *Acta Acust. United Acust.*, **84** (5), 986 (1998). <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaau/1998/00000084/00000005/art00025>
- [11] L. Yusuf, M.D. Symes, P. Prentice, *Ultrason. Sonochem.*, **70** (1), 105273 (2020). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105273
- [12] H. Hasanzadeh, M. Mokhtari-Dizaji, S.Z. Bathaie, Z.M. Hassan, *Ultrason. Sonochem.*, **17** (5), 863 (2010). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.02.009
- [13] А.В. Котухов, В.С. Гаврилюк, В.С. Минчук, Н.В. Дежкунов, *Докл. БГУИР*, **18** (4), 80 (2020). <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/2703>
- [14] *Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Мощность ультразвука в жидкостях. Общие требования к методикам измерений в диапазоне частот от 0.5 до 25 МГц*, ГОСТ Р МЭК 61161–2009 (Стандартинформ, М., 2019). <https://docs.cntd.ru/document/1200078393>
- [15] P. Martinez, N. Bottenus, M. Borden, *Pharmaceutics*, **14** (9), 1925 (2022). DOI: 10.3390/pharmaceutics14091925
- [16] В.А. Канаков, Д.А. Селивановский, *Акуст. журн.*, **56** (4), 447 (2010). [V.A. Kanakov, D.A. Selivanovskii, *Acoust. Phys.*, **56** (4), 441 (2010). DOI: 10.1134/S1063771010040068].
- [17] H. Lin, B.D. Storey, A.J. Szeri, *Phys. Fluid*, **14** (8), 2925 (2002). DOI: 10.1063/1.1490138
- [18] T.G. Leighton, *Acoustic bubble* (Academic Press, London, 1997).
- [19] A.A. Doinikov, in *Proc. 2nd Int. Symp. on two-phase flow modelling and experimentation* (Pisa, Italy, 1999), vol. 1, p. 601–606.
- [20] J.H.J. van der Meulen, in *Proc. Joint ASCE/ASME Conf. on cavitation in hydraulic structures and turbomachinery*, ed. by R.E.A. Arndt, D.R. Webb (American Society of Mechanical Engineers, N.Y., 1986), vol. 25, p. 149–159.
- [21] J.H.J. van der Meulen, Y. Nakashim, in *Proc. 2nd Int. Conf. on cavitation* (Institution of Mechanical Engineers, London, 1983), p. 13–19.