

03.1

## Анализ механизма генерирования непрерывной составляющей кавитационного шума

© Н.В. Дежунов<sup>1</sup>, В.С. Минчук<sup>1</sup>, С.В. Уваров<sup>2</sup>, Е.А. Курлюк<sup>1</sup><sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

E-mail: dnv@bsuir.by

Поступило в Редакцию 25 октября 2023 г.

В окончательной редакции 30 ноября 2023 г.

Принято к публикации 4 декабря 2023 г.

Показано, что нарушение периодичности пульсаций кавитационных пузырьков в разных точках ультразвукового поля может быть одним из механизмов генерирования непрерывной составляющей в спектре кавитационного шума. Вклад этого фактора растет с ростом степени аperiodичности генерируемых пузырьками возмущений и не связан однозначно с интенсивностью ударных волн, генерируемых при захлопывании пузырьков. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие этот вывод.

**Ключевые слова:** кавитация, захлопывание пузырьков, белый шум, сонолюминесценция.

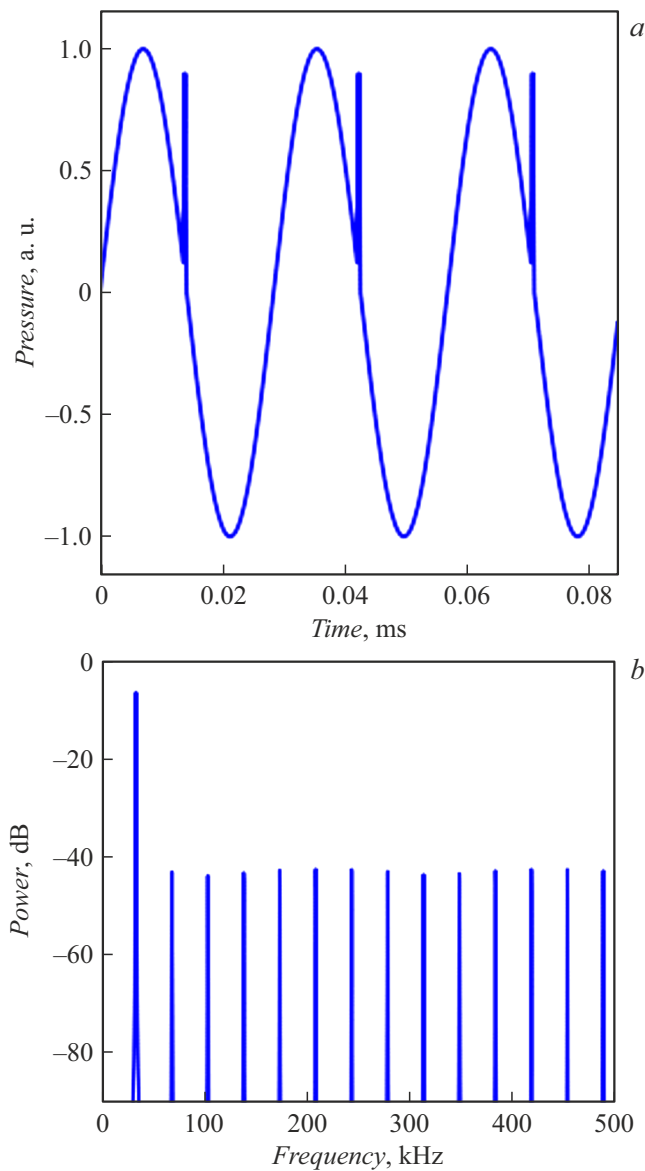
DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57298.19779

Кавитация представляет собой явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости под действием переменного давления [1]. При пульсациях и захлопывании в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал — кавитационный шум (КШ) [1,2]. Многие авторы (см., например, [3–7]) указывали на возможность использования кавитационного шума для детектирования и исследования кавитации с использованием спектрального анализа КШ. Считается, что механизм генерирования непрерывной составляющей в спектре КШ связан с захлопыванием кавитационных полостей, т.е. с нестационарной кавитацией. Эта гипотеза обоснована тем, что при захлопывании пузырька генерируется ударная волна, которую в первом приближении можно аппроксимировать дельта-функцией [6,7]. А спектр дельта-функции, как известно, непрерывный. Исходя из таких представлений непрерывная составляющая КШ (НСКШ) широко используется для оценки активности нестационарной кавитации [5,7,8].

В настоящей работе анализ механизма генерирования НСКШ выполнен путем моделирования возможных искажений (возмущений) исходного синусоидального ультразвукового поля, вносимых кавитационными полостями. Использовался следующий алгоритм. В докавитационном режиме давление в звуковом поле считается изменяющимся по синусоидальному закону. При возникновении кавитации на исходный синусоидальный сигнал накладываются акустические возмущения. Вид результирующего возмущения выбирается исходя из известных закономерностей динамики отдельных пузырьков и кавитационной области в целом. Сформированный таким способом сигнал в цифровом представлении подвергается спектральному анализу методом фурье-преобразования.

В качестве первого приближения рассмотрим случай единичного пузырька в сферически-симметричном сфокусированном ультразвуковом поле. Этот случай реализуется в экспериментах с однопузырьковой сонолюминесценцией (ОПСЛ) [9,10]. В такой системе быстрое сжатие пузырька (захлопывание) происходит в конце первой половины или в начале второй половины полупериода сжатия ультразвуковой волны. Процесс повторяется в каждом периоде в одной и той же фазе с высокой степенью периодичности и сопровождается синхронным генерированием акустического импульса и вспышки сонолюминесценции [9]. Результирующий акустический сигнал представлен на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* показан результат спектрального анализа такого сигнала. Спектр включает основную частоту  $F_0$  и гармоники  $nF_0$ . Непрерывная составляющая отсутствует.

В работе [9] приведены данные, показывающие, что при увеличении звукового давления  $P_A$  выше  $1.5P_0$  (где  $P_0$  — гидростатическое давление) однопузырьковая система переходит в режим нестабильного генерирования сонолюминесценции. Пузырек при этом неустойчив и хаотически колеблется в пространстве вблизи точки максимального давления. Фаза пульсаций такого пузырька варьируется стохастически около некоторого среднего положения относительно фазы волны. При моделировании соответствующего акустического сигнала для каждого последовательного периода ультразвука задавалось смещение генерируемого пузырьком импульса  $\Delta t$  от среднего положения, варьируемое случайным образом с ограничением максимальной величины значением  $\Delta t^*$ . Случайный характер смещения  $\Delta t$  обеспечивался прибавлением к выбранному моменту времени появления импульса величины  $\Delta t^*$ , умноженной на случайное число в диапазоне от 0 до 1. Последовательность случайных чисел генерировалась с использованием функции [10].

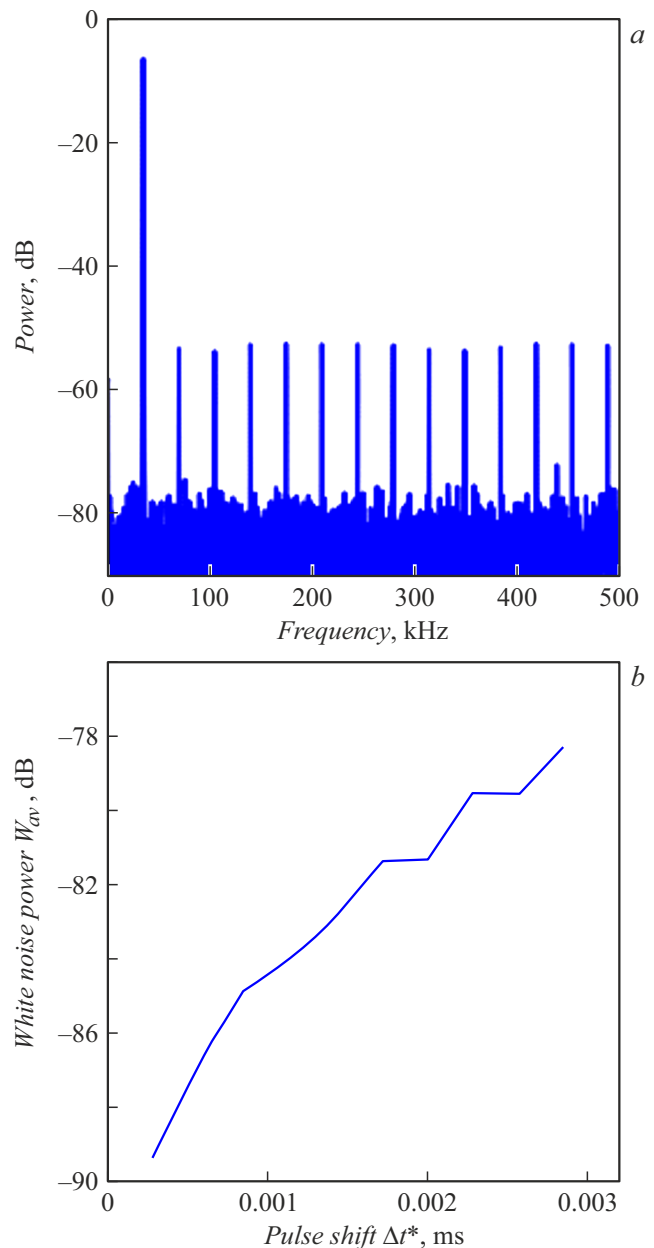


**Рис. 1.** Акустический сигнал (а) и его спектр (б) для случая периодического импульсного возмущения синусоидального сигнала (ОПСЛ).  $F_0 = 35$  kHz, высота периодического импульса составляет  $0.9P_A$  ( $P_A$  — амплитуда звукового давления).

На рис. 2, а показан спектр полученного сигнала. Видно, что имеется основная частота, гармоники и непрерывная составляющая. На рис. 2, б приведена зависимость средней мощности НСКШ от величины  $\Delta t^*$ , которая определяет степень аperiodичности пульсаций пузырька. Из представленных данных следует, что величина НСКШ, обусловленная аperiodичностью акустических возмущений, быстро увеличивается с ростом  $\Delta t^*$  и может вносить значительный (если не основной) вклад в итоговое значение НСКШ.

В многопузырьковой кавитационной области суммарный акустический сигнал в любой заданной достаточно малой области поля (точке), где находится датчик,

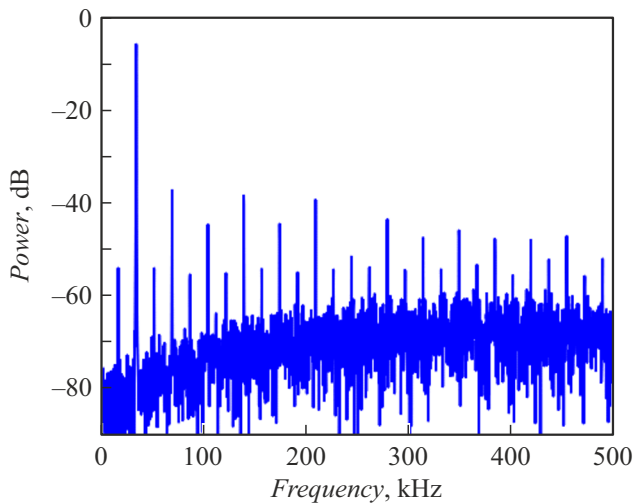
формируется из возмущений, генерируемых не только близлежащими пузырьками, но и находящимися на значительном удалении. Импульсы от удаленных пузырьков в данную точку будут приходить с некоторой задержкой во времени по отношению к моменту захлопывания. Кавитационная область, как известно [1,11,12], включает пузырьки разных размеров, и распределение по размерам может меняться от периода к периоду. В соответствии с размерами меняется их динамика, захлопывание происходит в различные по отношению к фазе звуковой волны моменты времени. Кроме того, пузырьки стохастически перемещаются в объеме



**Рис. 2.** Спектр результирующего акустического сигнала для случая нестабильной ОПСЛ (а) и зависимость средней мощности НСКШ этого сигнала от  $\Delta t^*$  (б).  $F_0 = 35$  kHz, высота импульса  $0.3P_A$ .

Зависимость выходного сигнала фотоумножителя  $L$  и непрерывной составляющей  $H$  акустического сигнала

Параметр	$U, V$							
	150	175	200	225	250	275	300	320
$L, mV$	372	410	347	272	193	146	139	137
$H, mV$	47.4	47.1	51.6	54.0	61.5	62.7	64.9	66.3



**Рис. 3.** Спектр акустического сигнала многопузырьковой сонолюминесценции.  $F_0 = 35$  kHz, высота аperiodического импульса  $0.3P_A$ .

жидкости вследствие взаимодействий между собой и с полем и распадаются на части при захлопывании. Учитывая изложенное, логично предположить, что результирующее акустическое возмущение, генерируемое многопузырьковой кавитационной областью в заданной точке поля, не может быть строго периодическим. Такое возмущение в настоящей работе моделировали в виде последовательных импульсов, интенсивность и фаза которых варьировались случайным образом в некотором заданном диапазоне величин. Спектр результирующего сигнала включает основную частоту и непрерывную составляющую.

Распределение пузырьков по размерам в кавитационной области имеет вид кривой с максимумом [11]. При этом наибольшее количество пузырьков (более 50%) сосредоточено в узком диапазоне размеров. Ясно, что пузырьки из этого диапазона будут захлопываться с незначительной задержкой относительно друг друга, формируя при этом квазипериодический импульс, т.е. импульс, фаза которого хаотически варьируется вблизи некоторого положения относительно фазы волны. Спектр результирующего сигнала, как показывает анализ, включает основную частоту, гармоники и НСКШ.

В работе [13] показано, что кавитационная область при достаточно большой концентрации пузырьков пульсирует как целое с частотой ниже  $F_0$ , например  $F_0/2$ .

Однако даже в этом случае пузырьки захлопываются не одновременно. Поэтому периодическая добавка, вызванная пульсациями кавитационной области, будет представлять собой периодический шум, повторяющийся, например, через один период. Спектр данного сигнала (рис. 3) включает непрерывную составляющую, гармоники  $nF_0$ , субгармонику  $F_0/2$  и частоты  $(2n + 1)F_0/2$ , т.е. по составу полностью соответствует регистрируемым экспериментально спектрам КШ [4,7].

Нами получено также экспериментальное подтверждение вывода о неоднозначной связи непрерывной составляющей КШ с захлопыванием кавитационных полостей и генерируемыми при этом ударными волнами. Исследование проводилось в импульсном фокусированном поле частотой  $F_0 = 720$  kHz с использованием установки, представленной в [5,8]. Регистрировался выходной сигнал фотоумножителя  $L$  и величина непрерывной составляющей  $H$  при длительности импульсов ультразвука  $\tau = 5$  ms и периоде следований импульсов  $T = 15$  ms. В таблице приведены результаты измерений  $L$  и  $H$  в зависимости от напряжения на излучателе  $U$ . Видно, что при данных параметрах импульсов ультразвука начиная с напряжения на излучателе  $U = 175$  V интенсивность сонолюминесценции уменьшается по мере увеличения  $U$ , а интенсивность НСКШ увеличивается, т.е. наблюдается отрицательная корреляция данных параметров между собой.

Уменьшение интенсивности сонолюминесценции при увеличении интенсивности ультразвуковых колебаний наблюдается на четвертой стадии развития кавитационной области [8], когда достигается состояние пересыщения кавитационной области пузырьками. Это состояние характеризуется интенсивными взаимодействиями пузырьков между собой и распадом на осколки на ранней стадии захлопывания, что может приводить к увеличению вариаций концентрации пузырьков от периода к периоду и повышению аperiodичности захлопывания. Таким образом, в настоящей работе впервые показано, что аperiodический характер пульсаций и захлопывания пузырьков в кавитационной области является возможным механизмом генерирования непрерывной составляющей в спектре кавитационного шума. Этот результат является важным с точки зрения совершенствования методов исследования кавитации и имеет перспективу практического применения, в частности, в приборах для оценки уровня активности кавитации и контроля ка-

витационных режимов ультразвуковых технологических процессов в жидкостях.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/562 от 23 марта 2021 г. в части анализа сигналов кавитационного шума и при поддержке проекта РФФИ № 20-41-596013 в части экспериментальной методологии регистрации и анализа акустического сигнала.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М.Г. Сиротюк, *Акустическая кавитация* (Наука, М., 2008).
- [2] T.G. Leighton, *Acoustic bubble* (Pergamon Press, London, 1995).
- [3] В.Н. Алексеев, В.Г. Андреев, Г.А. Романенко, С.А. Рыбак, *Акуст. журн.*, **47** (4), 442 (2001). [V.N. Alekseev, V.G. Andreev, G.A. Romanenko, S.A. Rybak, *Acoust. Phys.*, **47** (4), 376 (2001). DOI: 10.1134/1.1385409].
- [4] Н.В. Дежкунов, А. Francescutto, F. Calligaris, А.Л. Николаев, *Письма в ЖТФ*, **40** (16), 73 (2014). [N.V. Dezhkunov, A. Francescutto, F. Calligaris, A.L. Nikolaev, *Tech. Phys. Lett.*, **40** (8), 712 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014080173].
- [5] А.В. Котухов, В.С. Гаврилюк, Н.А. Жарко, В.С. Минчук, Н.В. Дежкунов, *Проблемы физики, математики и техники*, № 4 (45), 32 (2020).
- [6] P. Wu, X. Wang, W. Lin, L. Bai, *Ultrason. Sonochem.*, **82**, 105878 (2022). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105878
- [7] N. Xu, Y. Yu, W. Zhai, J. Wang, B. Wei, *Ultrason. Sonochem.*, **94**, 106343 (2023). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106343
- [8] N.V. Dezhkunov, A. Francescutto, L. Serpe, R. Canaparo, G. Cravotto, *Ultrason. Sonochem.*, **40**, 104 (2018). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004
- [9] M.P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.*, **74** (2), 425 (2002). DOI: 10.1103/RevModPhys.74.425
- [10] *Random Numbers in NumPy* [Электронный ресурс]. <https://www.scaler.com/topics/numpy/numpy-random/> (дата обращения: 05.09.2023).
- [11] J. Holzfuss, M. Rugeberg, A. Billo, *Phys. Rev. Lett.*, **81** (24), 5434 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.5434
- [12] J. Lee, M. Ashokkumar, S. Kentish, F. Grieser, *J. Am. Chem. Soc.*, **127** (48), 16810 (2005). DOI: 10.1021/ja0566432
- [13] L. Yusuf, M.D. Symes, P. Prentice, *Ultrason. Sonochem.*, **70**, 105273 (2021). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105273