

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОПУЗЫРЬКОВОЙ КАВИТАЦИИ*Курлюк Е.А., Олешук И.Е., Перхунова А.Ю.**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь**Дежкунов Н.В. – к. т. н., доцент, зав. НИЛ 5.2*

Аннотация. В работе рассматривается моделирование кавитационного шума, возникающего при однопузырьковой кавитации, с целью анализа механизмов формирования его спектральных составляющих. Исследование выполнено на основе численного моделирования акустического сигнала, формируемого при регулярных и нерегулярных пульсациях сферически симметричного пузырька. Анализ проведён для двух типов нарушений периодичности: случайного смещения фазы импульсов и вариации их амплитуды. Полученные спектры демонстрируют, что именно амплитудные флуктуации оказывают более выраженное влияние на рост непрерывной составляющей спектра по сравнению с временной асинхронностью.

Ключевые слова. Кавитация, кавитационный шум, математическое моделирование, спектральный анализ, преобразование Фурье, спектральные компоненты кавитационного шума.

Введение. Кавитация представляет собой процесс формирования, колебаний и последующего схлопывания микроскопических пузырьков газа в жидкости под воздействием переменного давления [1]. Переменное давление может возникать, в частности, при прохождении через жидкость звуковой волны большой интенсивности (на практике обычно используют звук частотой более 20 кГц – ультразвук).

При достаточно высокой интенсивности ультразвука кавитация сопровождается специфическими явлениями, такими как звуколюминесценция (свечение нагретого газа внутри схлопывающихся полостей), эрозия твердых тел, вызванная микро-кумулятивными струями и ударными волнами в жидкости, активация химических реакций в кавитационной области, генерирование широкополосного акустического сигнала (кавитационного шума) и т.д. Перечисленные явления взаимосвязаны, так как все они возникают благодаря схлопываниям пузырьков. Интенсивность подобных эффектов характеризуется понятием активности кавитации. Практические применения кавитации (ультразвуковая очистка, диспергация, сонохимия) связаны именно с этими явлениями, поэтому задача контроля активности кавитации является весьма значимой.

Основная часть. Один из способов оценки активности кавитации – регистрация сигнала с акустического датчика, погруженного в кавитирующую жидкость. Обычно датчик включает в себя пьезоэлектрический преобразователь, который и преобразует акустические колебания, в том числе кавитационный шум, в электрический сигнал.

Как было отмечено выше, в результате процессов пульсаций и схлопывания пузырьков в кавитационной зоне возникает сложный акустический сигнал – кавитационный шум. В режиме развитой кавитации, т.е. при интенсивности ультразвука значительно выше порога кавитации, спектр КШ включает основную частоту f_0 ультразвукового поля, возбуждающего кавитацию, гармоники nf_0 , где n – целое число, субгармонику $f_0/2$, частоты $(2n+1)f_0/2$ и непрерывную составляющую белого шума. Поскольку излучение кавитационного шума связано с динамикой движения пузырьков, разумно предположить, что он несёт в себе сведения о состоянии кавитационной области и характере поведения пузырьков. В связи с этим спектральный анализ кавитационного шума рассматривается как перспективный инструмент изучения кавитационных явлений. Однако применение данного подхода осложняется недостаточной теоретической проработанностью механизмов формирования спектральных составляющих кавитационного шума [2].

Целью данной работы являлось развитие фундаментальных представлений о механизмах формирования спектральных составляющих кавитационного шума и их анализ путем моделирования возможных искажений исходного синусоидального ультразвукового поля, вносимых кавитационными полостями.

В рамках исследования выполнено математическое моделирование однопузырьковой кавитации, представляющей собой регулярные пульсации сферически симметричной кавитационной полости. Аналогичные процессы наблюдаются в экспериментах по звуколюминесценции одиночного пузырька (однопузырьковая звуколюминесценция). В подобных системах резкое схлопывание пузырька обычно происходит в фазе сжатия ультразвуковой волны, преимущественно в конце первой половины или в начале второй половины соответствующего полупериода. При этом радиус пузырька в момент схлопывания меньше его максимального радиуса в десятки раз, что обуславливает сильное адиабатическое сжатие парогазовой смеси внутри полости.

На основании спектрального анализа излучения, испускаемого при звуколюминесценции, и теоретических расчетов показано, что максимальная температура в режиме однопузырьковой звуколюминесценции в оптимальных условиях достигает 40000 К [3], а соответствующие давления – до 1000 атм. Устойчивое состояние однопузырьковой звуколюминесценции реализуется при звуковых давлениях до 1,5 атм. При больших амплитудах звукового давления кавитационный пузырек становится неустойчивым, деформируется и распадается на части.

Математическая модель однопузырьковой кавитации основана на представлении ультразвукового поля в виде непрерывного синусоидального сигнала, в который периодически добавляются акустические импульсы, соответствующие моменту схлопывания пузырька. На рисунке 1 а показан результирующий сигнал. Схлопывание кавитационного пузырька моделируется как импульсное повышение давления с амплитудой $P_{\text{имп}}$, равной 0,9 от амплитуды акустического давления P_A , в определенные моменты времени, соответствующие фазе схлопывания. Импульсы вводятся в одну и ту же фазу каждого периода ультразвуковой волны. Спектральный анализ полученного сигнала осуществлялся с помощью преобразования Фурье. Рисунок 1 б иллюстрирует спектр полученного сигнала, в котором отчётливо выделяются основная частота F_0 и гармоники основной частоты nF_0 , обусловленные регулярностью схлопываний. Непрерывная составляющая спектра отсутствует. На рисунке 1 в изображена зависимость мощности гармоник в спектре от амплитуды импульса $P_{\text{имп}}$. Данные результаты моделирования показывают, что при высокой степени периодичности и постоянной амплитуде акустических импульсов от схлопываний формируется устойчивый спектр с выраженными гармоническими компонентами.

В работе [3] приведены данные, показывающие, что при увеличении звукового давления P_A выше $1,5 P_0$, где P_0 – гидростатическое давление, однопузырьковая система переходит в режим нестабильного генерирования звуколюминесценции. Кавитационный пузырёк при этом становится неустойчивым и хаотически колеблется в пространстве вблизи точки максимальной амплитуды звукового давления. Фаза схлопывания такого пузырька варьируется случайным образом вокруг некоторого среднего положения относительно фазы звуковой волны.

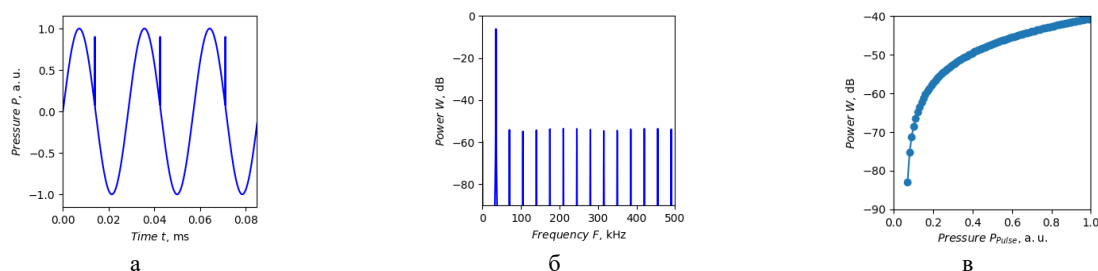


Рисунок 1 – Моделирование однопузырьковой кавитации при высокой степени периодичности захлопывания пузырька: а - сигнал; б – спектр; в – зависимость высоты гармоник от $P_{\text{имп}}$

Для моделирования соответствующего акустического сигнала в программе для каждого последовательного периода ультразвука задавалось смещение импульса Δt от среднего положения, случайным образом изменяющееся с ограничением максимальной величины абсолютного значения Δt , т.е. принималось, что абсолютное значение Δt не может быть больше некоторого заданного Δt^* . Амплитуда импульса при этом оставалась постоянной и равной $0,9 P_A$. Распределение величины Δt было равномерным на отрезке от $-\Delta t^*$ до Δt^* .

На рисунке 2 а показан сигнал во временной области, полученный в результате моделирования с учётом случайных смещений Δt . Видно, что импульсы от захлопывания кавитационного пузырька теперь не строго периодичны. На рисунке 2 б представлен спектр этого сигнала, который включает основную частоту F_0 , гармоники nF_0 и непрерывную составляющую, возникающую вследствие аperiodичности импульсов. На рисунке 2 в приведена зависимость средней мощности непрерывной составляющей кавитационного шума от величины Δt^* , которая определяет степень аperiodичности пульсаций пузырька, задавая максимально возможное отклонение фазы импульса от среднего положения.

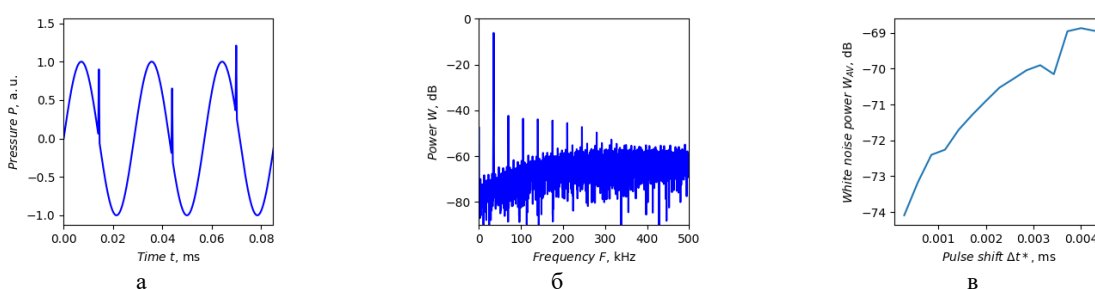


Рисунок 2 – Однопузырьковая кавитация при захлопывании пузырька с нарушением периодичности: а – сигнал; б – спектр сигнала, в – зависимость непрерывной составляющей кавитационного шума от Δt^* ; амплитуда импульса $P_{\text{имп}} = 0,9 P_A$

В работе [4] показано, что при однопузырьковой кавитации вблизи твердой поверхности амплитуда импульса от схлопывания пузырька может значительно варьироваться в зависимости от начального расстояния пузырька до поверхности и давления окружающей среды, что определяет скорость микроструи и давление на поверхность. С изменением этих параметров варьируется амплитуда импульсов, действующих на датчик.

Для моделирования данного эффекта был рассмотрен случай, где амплитуда импульсов, соответствующих схлопыванию пузырька, варьируется случайным образом на величину ΔP , которая лежит в пределах заданного диапазона от $-\Delta P^*$ до ΔP^* (распределение равномерное). В данной модели учитывается возможность изменения энергии пузырька, высвобождаемой при схлопывании, из-за флуктуаций окружающих условий. В результате получен акустический сигнал, представленный на рисунке 3 а, где амплитуды импульсов изменяются от периода к периоду.

Спектральное представление этого сигнала показано на рисунке 3 б. В отличие от случая с вариацией фазовых смещений (рисунок 2 б), здесь непрерывная составляющая спектра имеет несколько иной характер и меньшую мощность, однако в итоге достигает сравнимых значений мощности в связи с более быстрым ростом мощности непрерывной составляющей при увеличении ΔP^* . На рисунке 3 в представлена зависимость средней мощности непрерывной составляющей кавитационного шума от диапазона вариации амплитуд импульсов. Увеличение разброса амплитуд импульсов приводит к росту непрерывной составляющей спектра кавитационного шума.

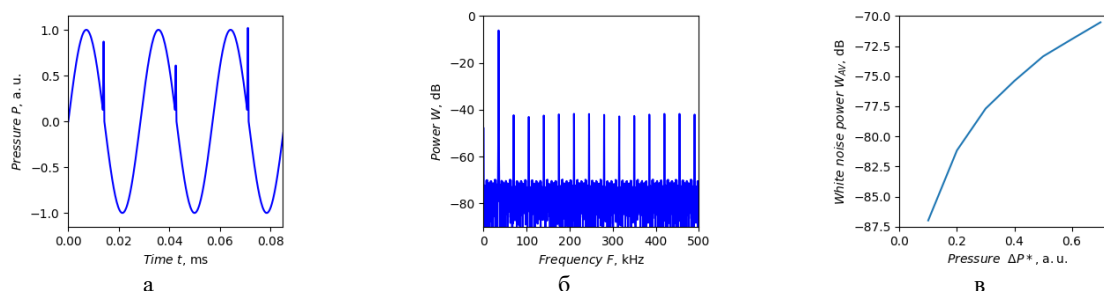


Рисунок 3 – Моделирование кавитационного шума однопузырьковой кавитации при варьировании величины кавитационного импульса, генерируемого пузырьком: а – сигнал; б – спектр; в - зависимость непрерывной составляющей кавитационного шума от ΔP^*

Заключение. На основании представленных результатов можно сделать вывод о различной чувствительности спектральных характеристик кавитационного шума при однопузырьковой кавитации к двум типам возмущений: временной асинхронности импульсов и вариации их амплитуды. Несмотря на то, что оба механизма нарушают периодичность сигнала, именно изменение амплитуды импульсов (рисунок 3 в) оказывает более существенное влияние на рост мощности непрерывной составляющей спектра кавитационного шума по сравнению с фазовыми сдвигами (рисунок 2 в). Это указывает на то, что энергетические флуктуации, сопровождающие схлопывание пузырька, играют более значимую роль в формировании характерного спектра кавитационного шума, чем нарушение строгой временной синхронизации.

Полученные данные дополняют современные модели ультразвуковой кавитации, учитывая влияние асинхронности и энергетических флуктуаций кавитационных процессов на формирование непрерывной составляющей спектра. Результаты исследования позволяют углубить понимание физики кавитационных явлений и усовершенствовать существующие подходы к моделированию акустических процессов.

Список литературы

1. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. М.: Наука, 2008.
2. Pengfei, W. Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review / W. Pengfei // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2022. – Vol. 70. – P. 10.
3. Brenner, M. P. Single-Bubble Sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // *Rev. Mod. Phys.* - 2002. - Vol. 74. - P. 65–144.
4. Hsiao, C.-T. Modelling of material pitting from cavitation bubble collapse / Chao-Tsung Hsiao, A. Jayaprakash, A. Kapahi, J.-K. Choi, Georges L. Chahine // *Journal of Fluid Mechanics*. - 2014. - V. 755. - P. 142–175.

UDC 534-8

MODELING OF SINGLE-BUBBLE CAVITATION

Kurliuk E.A., Oleshuk I.E., Minchuk V.S., Perkhunova A.Yu.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dezhkunov N.V. – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of RL 5.2

Annotation. The study investigates the modeling of cavitation noise arising from single-bubble cavitation, aiming to analyze the mechanisms behind the formation of its spectral components. The research is based on numerical simulations of the acoustic signal generated by regular and irregular pulsations of a spherically symmetric bubble. The analysis focuses on two types of periodicity disturbances: random phase shifts of the pulses and variations in their amplitude. The obtained spectra demonstrate that amplitude fluctuations have a more pronounced effect on the growth of the continuous spectral component compared to temporal asynchrony.

Keywords. Cavitation, cavitation noise, mathematical modeling, spectral analysis, Fourier transform, spectral components of cavitation noise.