

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

УДК 534.29

Жарко
Наталья Алексеевна

Спектрально-акустический метод зондирования кавитационной области

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель Дежкунов Н. В.
канд. техн. наук, доцент

Минск 2021

ДР 62 с., 23 рис., 44 источн., 2 прил.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, КАВИТАЦИОННЫЙ ШУМ, УЛЬТРАЗВУК, ИЗМЕРЕНИЕ, ИНТЕНСИВНОСТЬ, ЗВУКОЛЮМИНЕСТИНЦИЯ

Цель работы – установить спектральные характеристики кавитационного шума в гелевых имитатах биологических структур и разработать метод обнаружения кавитации и контроля ее активности, основанный на спектральном анализе кавитационного шума.

Задачи:

1. Выполнить аналитический обзор по теме диссертации;
2. Разработать методику исследования кавитационного шума в жидкостях и гелевых имитатах биологических структур;
3. Разработать конструкцию датчиков со сменными волноводами;
4. Провести испытания датчиков и определить влияние диаметра волновода на разрешающую способность, чувствительность датчиков кавитации, а также спектральные характеристики кавитационного шума;
5. Установить закономерности эволюции спектров кавитационного шума при увеличении интенсивности ультразвука и выделить спектральные характеристики кавитационного шума, коррелирующие с активностью кавитации;
6. Исследовать корреляцию параметров спектральных характеристик кавитационного шума и активности кавитации;
7. Исследовать влияние дегазирования пересыщенного раствора углекислого газа на характер спектральных характеристик кавитационного шума;
8. Провести анализ спектральных характеристик кавитационного шума в максимумах и минимумах стоячей волны в жидкостях, различающихся по кавитационным свойствам.

Объект исследования – кавитация в жидкостях и гелевых имитатах биологических структур.

Предмет исследования – спектры кавитационного шума и корреляция спектральных характеристик с активностью кавитации.

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения высокой воспроизводимости кавитационных режимов при воздействии ультразвуком на биологические объекты, в частности, при разработке новых методов ультразвуковой терапии. Применение разрабатываемого метода позволит повысить эффективность использования оборудования при воздействии на опухолевые клетки. Разрабатываемые метод контроля и датчики будут использоваться при создании прибора для обнаружения кавитации и оценки ее активности в жидкостях, гелевых имитатах

биологических структур и биологических тканях – ВЧ кавитометра. Возможные области применения – медицина и биология, а также при разработке и внедрении новых методов ультразвуковой терапии.

Отсутствие специализированных приборов для исследования кавитации идентификации стадий ее развития - одна из причин того, что ряд потенциально эффективных технологий до сих пор не внедрен в практику в широких масштабах. Это обстоятельство является также причиной того, что результаты воздействия ультразвуком в кавитационном режиме на процессы или объекты (особенно на биологические структуры), полученные в различных лабораториях при одинаковых или близких условиях воздействия, часто различаются довольно существенно и характеризуются низкой воспроизводимостью.

Сущность методики исследований состоит в одновременной регистрации эффектов, характеризующих активность кавитации и спектров кавитационного шума. Для характеристики активности кавитации будет использоваться интенсивность звуколюминесценции.

Для возбуждения ультразвука будут использоваться пьезокерамические преобразователи с резонансными частотами в диапазоне 10 кГц – 2000 кГц. Имеющееся в лабораториях сторон оборудование позволяет выполнять спектральный анализ акустических сигналов в диапазоне 1 кГц – 10 МГц при интенсивности от 0.001 Вт/см².

Положения, выносимые на защиту:

- Увеличение диаметра волновода ведет к возрастанию чувствительности датчика и уменьшению его разрешающей способности: наилучшей разрешающей способностью обладает датчик с диаметром волновода 2 мм и менее в диапазоне частот от 30 кГц до 10 МГц, но такой волновод обеспечивает наихудшую чувствительность.
- Увеличении диаметра волновода сильно растет чувствительность датчика в низкочастотной области (до 250 кГц), и не сильно на более высоких частотах. При использовании датчика с диаметром волновода 2 мм и менее основной вклад в результирующий сигнал датчика вносит высокочастотная составляющая, по мере увеличения диаметра волновода вклад низкочастотной области резко возрастает, при использовании волновода более 5 мм низкочастотная область преобладает над высокочастотной.
- Интенсивность звуколюминесценции коррелирует наилучшим образом с интегральной интенсивностью кавитационного шума за вычетом всех гармоник, что определяет ее как параметр для оценки активности кавитации.
- По мере дегазации раствора углекислого газа в кавитационной области уменьшается доля больших полостей, неэффективных с точки зрения генерирования ударных волн и увеличивается доля пузырьков, при захлопывании которых генерируются кавитационные эффекты.

Для исследования влияния диаметра волновода на чувствительность и разрешающую способность был сконструирован датчик со сменными волноводами, которые крепятся к основной части с помощью резьбового соединения М3. Были изготовлены волноводы с диаметрами D равными 2, 3, 5, 10, 12 мм. Следует отметить, что наличие резьбового соединения уменьшает чувствительность датчика по сравнению с датчиками, у которых волновод цельный. В данном случае механические колебания передаются к основной части датчика как через резьбу, так и через место контакта основной части и расширения волновода. Данная конструкция имеет весомое преимущество: можно присоединять волноводы любых размеров, что значительно повышает область его применения.

Измерения проводились в четырех частотных диапазонах: от 10 до 10000 кГц; от 30 до 10000 кГц; от 100 до 10000 кГц; от 300 до 10000 кГц для избежания искажений исходного звукового поля, создаваемого излучателем, и влиянием резонанса на определенные части спектра.

По полученным зависимостям видно, что диаметр волновода значительно влияет на чувствительность датчика. При увеличении диаметра растет и чувствительность, причем скорость роста различается на разных частотах. Во всех диапазонах частот наблюдается резкий рост чувствительности при увеличении диаметра до 5 мм. В диапазоне от 10 кГц продолжается резкое возрастание чувствительности, однако в более высокочастотных диапазонах рост резко ослабевает, причем при увеличении частоты скорость падает.

Приведены графики зависимости активности кавитации от глубины погружения датчика. Под разрешающей способностью датчика мы будем понимать то как хорошо он выделяет максимумы и минимумы распределения звукового объема в объеме ванны.

В целом можно сказать, что в данном диапазоне датчик с толстым волноводом обладает большей чувствительностью, но разрешающая способность низкая для всех случаев.

Наилучшей разрешающей способностью обладает датчик с диаметром волновода 2 мм в диапазоне частот от 30 кГц до 10 МГц, но такой волновод обеспечивает наихудшую чувствительность. Однако, активность кавитации лучше всего оценивать по высокочастотной составляющей. Это связано с тем что в спектр сигнала может входить шум генератора (34 кГц).

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что при увеличении диаметра волновода сильно растет чувствительность датчика в низкочастотной области (до 250 кГц), и не сильно на более высоких частотах. При использовании тонкого волновода основной вклад в результирующий сигнал датчика вносит высокочастотная составляющая, по мере увеличения диаметра волновода вклад низкочастотной области резко возрастает, при использовании волновода более 5 мм низкочастотная область преобладает над высокочастотной.

Чем больше диаметр волновода тем большая часть волны отражается от волновода. Следует учитывать что отраженная от границы волновода волна, в отличие от границы с воздухом, совпадает по фазе с падающей волной. Вследствие этого давление на торец волновода удваивается. Фактором, возможно влияющим на полученные результаты является концентрация излучения при передаче ультразвука от волновода к пьезоэлементу, диаметр которого составляет 5 мм. Если диаметр волновода больше диаметра пьезоэлемента, то происходит концентрация энергии, если меньше-рассеяние.

Так как наибольший интерес для исследований представляет высокочастотная область, то использование тонкого волновода предпочтительнее, несмотря на меньшую чувствительность датчика.

Исследована эволюция спектра кавитационного шума при увеличении напряжения на излучателе.

Методика проведения исследования заключалась в регистрации спектральных характеристик кавитационного шума при измерении интенсивности звуколюминесценции, варьируя значением напряжения U на излучателе.

При интенсивности ультразвука ниже порога кавитации в спектре представлена только основная частота. Низкая интенсивность первой гармоники и отсутствие в спектре более высоких гармоник позволяет считать, что объёмная концентрация пузырьков в кавитационной области при этом незначительна и что пузырьки пульсируют синхронно с частотой ультразвукового поля, не внося искажений.

По мере увеличения интенсивности амплитуда пульсаций пузырьков увеличивается, равно как и степень нелинейности их движения. В результате излучаемый акустический сигнал становится все более сложным, а в спектре появляются все более высокочастотные гармоники и их интенсивность увеличивается.

При определённой интенсивности ультразвука появляются признаки непрерывной составляющей с одновременным возникновением в спектре кавитационного шума и звуколюминесценции. Поэтому можно утверждать, что появление непрерывной составляющей в спектре кавитационного шума является индикатором нестационарной кавитации, т.е. захлопывающихся полостей.

Представлены результаты сопоставления интенсивности ЗЛ и параметров спектра кавитационного шума, коррелирующих с интенсивностью ЗЛ

Из представленных графиков видно, что составляющая кавитационного шума без учёта всех гармоник наиболее близко коррелирует с интенсивностью звуколюминесценции. Это позволяет сделать вывод, что данный компонент спектра генерируется в результате захлопывания

пузырьков и может использоваться в качестве индикатора активности кавитации.

Представлена эволюция спектральных характеристик кавитационного шума по мере дегазации под действием ультразвука

Первый этап дегазации спектра кавитационного шума характеризуется относительно невысокой интенсивностью непрерывной составляющей и высокочастотных компонент. Это указывает, на то, что при пульсациях пузырьков не генерируется интенсивных ударных волн и кавитация не может оказывать интенсивного разрушающего воздействия на твердые поверхности. На втором этапе рост интенсивности низкочастотных компонент замедляется, а высокочастотная часть, наоборот, растет быстрее, приближаясь к спектру дистиллированной воды.

Таким образом, по мере дегазации раствора углекислого газа в кавитационной области уменьшается доля больших полостей, неэффективных с точки зрения генерирования ударных волн и увеличивается доля пузырьков, при захлопывании которых генерируются кавитационные эффекты.

Заключение

Наилучшим выбором датчика для проведения исследований кавитации является датчик с диаметром волновода 2 мм и менее в диапазоне частот от 30 кГц до 10 МГц, так как он обладает наилучшей разрешающей способностью, а ухудшением чувствительности датчика можно пренебречь, так как с увеличением диаметра чувствительность растет в низкочастотной области (до 250 кГц), и не сильно - на более высоких частотах, которые представляют наибольший интерес для проведения исследований. При проведении исследования эволюция спектров КШ в поле при увеличении интенсивности ультразвука, было установлено, что одновременно с появлением непрерывной составляющей в спектре кавитационного шума возникает также звуколюминесценция. Из этого сделан вывод, что непрерывная составляющая может использоваться в качестве индикатора нестационарной кавитации.

Интенсивность звуколюминесценции коррелирует наилучшим образом с интегральной интенсивностью кавитационного шума за вычетом всех гармоник. Следовательно, этот параметр может использоваться для оценки активности кавитации.

Отмечено, что при дегазации пересыщенного раствора углекислого газа спектры кавитационного шума для первой и второй стадий дегазации существенно различаются, что указывает на возможность идентификации стадий по спектру кавитационного шума. Исходя из анализа полученных спектров сделан вывод, что на первой стадии при пульсациях пузырьков не генерируется интенсивных ударных волн и кавитация в этом режиме не оказывает интенсивного разрушающего воздействия на твердые поверхности и биологические структуры.

Список публикаций

№ п/п	Наименование работы	Наименование издания, выходные данные	Кол-во страниц	Соавторы
Статьи (2):				
– в международных рецензируемых научных журналах				
1	Evolution of cavitation activity in carbonate dioxide aqueous solution in the process of ultrasonic treatment	East European Scientific Journal. – №5 (45). – part 2. – Warsaw, Poland: 2019. – P. 32-37	6	Kotukhov A., Minchuk V., Krasouski A., Dezhkunov N.
– в рецензируемых научных журналах СНГ и РБ				
1	Кавитация в водных растворах углекислого газа	Проблемы физики, математики и техники. - Гомель, 2019. - № 4 (41). - С.17-22. ISSN 2077-8708.	6	Котухов А.В., Минчук В. С., Сербин В.В., Дежкунов Н.В.
Статьи в трудах научных мероприятий				
– международных				
1	Исследование кавитации в водных растворах углекислого газа	XXXII сессия РАО. Сборник трудов, секция физической акустики. - Москва, 2019.- С.1360-1366	7	В.С. Минчук, А.Л. Николаев, В.В. Сербин, Н.В. Дежкунов
2	Оптимизация конструкции датчиков активности кавитации для неоднородных ультразвуковых полей	"Инновационные материалы и технологии – 2020". Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых. - Минск, 2020. - С. 440-444	5	В.С. Минчук, Д.Ю. Теребиленко
3	Импульсное модулирование ультразвукового поля как метод управления динамикой развития кавитационной области	материалы III-й Всероссийской акустической конференции, 25–29 мая 2020г. - Санкт-Петербург, Россия. - С. 65-66	2	Котухов А.В., Минчук В.С., Дежкунов Н.В.
Тезисы докладов на научных мероприятиях:				
– других, в том числе научно-практических				
1	Исследование характеристик кавитационной области при дегазации жидкости	материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. - Минск, БГУИР, 22–26 апреля 2019. - С. 62-63.	2	В.С. Минчук
2	Исследование распределения активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле	материалы 55-й юбилейной научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. - Минск, БГУИР, 22–26 апреля 2019. - С. 64-65.	2	В.С. Минчук

Библиотека БГУИР