

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

*На правах рукописи*

УДК 532.528

КРАСОВСКИЙ  
Андрей Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬ-  
НЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра техники и технологии

по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии»

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

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Дежкунов Николай Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент, зав. НИЛ  
5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудо-  
вание» учреждения образования «Белорус-  
ский государственный университет инфор-  
матики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Дробот Сергей Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
зав.кафедры электроники учреждения обра-  
зования «Белорусский государственный эко-  
номический университет информатики и ра-  
диоэлектроники»

Защита диссертации состоится «19» июня 2015 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседа-  
нии Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учре-  
ждении образования «Белорусский государственный университет информа-  
тики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 1  
уч.корп., ауд. 347, тел.: 293-89-92, e-mail: [kafei@bsuir.by](mailto:kafei@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектрони-  
ки».

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая обработка находит всё более широкое применение во многих сферах науки и промышленности. Внедрены с высоким технико-экономическим эффектом процессы ультразвуковой очистки от жировых и механических загрязнений, лаковых и полимерных пленок, окалины и продуктов коррозии. Успешно применяется ультразвук для сварки тонких листов алюминия, в процессах дегазации, эмульгирования, обогащения и предотвращения накипеобразования. Весьма перспективным является использование ультразвуковых колебаний большой интенсивности в порошковой металлургии для получения материалов высокой дисперсности.

В последнее время усилиями научных коллективов из разных стран установлены новые перспективные возможности применения мощного ультразвука. Например, в звукохимии, медицине, электрохимии, при обработке пищевых продуктов.

В настоящее время общепризнано, что ключевым фактором ультразвуковой интенсификации физико-химических процессов в жидкостях является кавитация – явление образования, роста и захлопывания микропузырьков в жидкости. Активность кавитации, понимаемая как интенсивность воздействия на тот или иной процесс в жидкой среде, определяется плотностью пузырьков и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в другие виды энергии

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Исследование закономерностей генерирования кавитации представляет собой довольно сложную задачу, т.к. процесс захлопывания происходит с большой скоростью (время захлопывания варьируется в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^8$  с), а размер пузырька предельно мал (варьируется от  $10^{-1}$  до  $10^{-3}$  мм). Поэтому не смотря на то, что кавитация интенсивно исследуется на протяжении нескольких десятилетий более или менее точные сведения о динамике кавитационной полости получены лишь для случая однопузырьковой кавитации, когда пузырёк удерживается в фокальной области сфокусированного поля довольно длительное время.

Что же касается многопузырьковой кавитационной области, то все известные методы оценки активности кавитации, как, например, эрозионный тест, йодная проба (т.е. выделение йода из раствора йодистого калия под действием ультразвука), измерение интенсивности звуколюминесценции-

меют ограниченные области применения и не позволяют осуществлять непрерывный контроль в процессе производства. Кроме того, результаты измерений зависят от множества препятствующих факторов, которые, как правило, не удается учесть в полном объеме. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности применения мощного ультразвука в технологии микроэлектроники, в медицине, неразрушающем контроле и химической промышленности, в силу чего представленная тема диссертации является актуальной.

### **Степень разработанности проблемы**

Среди большого числа эмпирических исследований по данной теме необходимо отметить работы Т.Г. Лейтона, Ф. Каллигариса, В.А. Акуличева, Р. Кнэша, Дж. Дейли, Ф. Хэммита, И. Ф. Пирсола и др.

Основным недостатком имеющихся знаний является их неоднозначность и зачастую их противоречивость.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является получение качественно новых знаний о механизмах генерирования спектральных составляющих кавитационного шума и разработка рекомендаций для создания более точного метода оценки активности кавитации.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- создать экспериментальную установку, разработать методику и схему измерений;
- провести ряд экспериментальных исследований кавитационного шума;
- осуществить компьютерное моделирование вторичного акустического сигнала кавитационной области и его спектральный анализ;
- проанализировать полученные данные, разработать рекомендации для создания более точного метода оценки активности кавитации.

**Объектом** исследования является акустическая кавитация в жидкости.

**Предметом** исследования являются механизмы генерирования спектральных составляющих кавитационного шума.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии».

## **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Теоретической основой диссертации являются результаты исследований отечественных и зарубежных учёных в области ультразвука, кавитации и других эффектов, сопровождающих ультразвуковую обработку в жидкостях.

Проведение экспериментальных исследований кавитационного шума и его спектральный анализ осуществлялся на специально созданной в ходе работы над диссертацией экспериментальной установке, разработанной на базе НИЧ БГУИР НИЛ 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование».

Для моделирования вторичного акустического сигнала кавитационной области использовался программный пакет MATLAB со встроенным симулятором работы виртуального прибора Simulink. Моделирование осуществлялось на основе экспериментальных данных и уже существующих исследований.

**Информационная база** диссертации сформирована на основе более ранних работ и исследований в данной области.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в интеграции теоретических, экспериментальных и модельных данных для получения более точных сведений о механизме генерирования спектральных составляющих кавитационного шума.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Возможность применения спектрального анализа для исследования кавитации, перспективы внедрения новых способов контроля активности кавитации в промышленность.

3. Закономерности, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволившие наблюдать развитие кавитационной области, используя спектральный анализ вторичного акустического сигнала, на основе которых были выдвинуты некоторые предположения о механизме генерирования спектральных составляющих кавитационного шума. Зависимости между интенсивностью звуколюминесценции и интегральной интенсивностью кавитационного шума, позволяющие однозначно судить о начале схлопывания микропузырьков в жидкости.

4. Компьютерное моделирование вторичного акустического сигнала кавитационного шума и его применение для исследования механизмов генерирования спектральных составляющих кавитационного шума.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что полученные результаты позволяют более детально изучить процесс возникновения, роста и развития кавитационной области, более глубоко изучить процес-

сы, происходящие в жидкости под действием ультразвука.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что, используя полученные результаты и предложенные рекомендации, может быть создан более точный метод оценки активности кавитации, пригодный для использования в процессе производства.

#### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были представлены на XIX международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Минск), международной научно-технической конференции «Современные тенденции развития науки и производства» (Кемерово), XVI международной научно-практической конференции «Техника и технологии: новые перспективы развития» (Москва).

#### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в пяти опубликованных работах общим объемом 12,0 п.л. (авторский объем 9,0 п.л.).

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, шести глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 80 страниц. Работа содержит 31 рисунок, 16 формул. Библиографический список включает 36 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматриваются современные состояния вопроса по теме диссертации и тенденции развития исследований в данной области. Дается представление о спектре кавитационного шума. Рассматривается возможность применения дискретного преобразования Фурье для исследования механизмов генерирования спектральных составляющих кавитационного шума.

**Во второй главе** представлена экспериментальная установка и методика измерений, применявшаяся в ходе работы над диссертацией. Также рассмотрены основные инструменты и возможности среды MATLAB для моделирования вторичного акустического сигнала кавитационного шума.

**В третьей главе** представлены экспериментальные исследования кавитационного шума с применением спектрального анализа. На основании экспериментальных исследований сделаны некоторые предварительные выводы.

**В четвёртой главе** феноменологически описан результирующий акустический сигнал одиночного кавитационного пузырька и многопузырьковой кавитации.

**В пятой главе** представлены результаты компьютерного моделирования вторичного акустического сигнала кавитационной области с его последующим спектральным анализом.

**В шестой главе** обобщены и проанализированы результаты исследований, предложены рекомендации к созданию более точного метода измерения активности кавитации.

**В приложении** приведены распечатанные слайды презентации магистерской диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, явление акустической кавитации можно считать достаточно хорошо изученным и описанным только на уровне феноменологии и эмпиризма, а методы исследования возможностей его практического применения – основанными на натуральных экспериментах и физическом моделировании процессов и аппаратов. Такие эксперименты в силу неоднозначности представлений в этой области знаний отличаются низкой интерпретируемостью и повторяемостью результатов, а физические модели трудно поддаются «масштабированию» при создании проектов промышленных аналогов.

Обладание же математической моделью кавитации и принципами численного сравнения между собой кавитационных процессов позволит при разработке прикладных технологий и оборудования избавиться от трудоемких этапов создания действующих макетов и даст возможность всецело полагаться на результаты лабораторной оптимизации того или иного процесса. Формализованное описание явления кавитации сведёт предпроектные исследования к лабораторному эксперименту и численному компьютерному моделированию по его результатам индустриальной технологии и потребного для ее реализации аппарата. Хотя при этом совсем отказаться от экспериментирования, вероятно, не удастся, но оно станет лабораторным процессом, при кото-

ром можно иметь дело с небольшими объемами обрабатываемых субстанций и с малогабаритной неэнергоёмкой техникой.

В данной работе анализ кавитационного шума с использованием как экспериментальной модели, так и компьютерного моделирования показал, что спектральные составляющие кавитационного шума позволяют получать важную информацию о протекании кавитационных процессов, с определённой долей точности диагностировать наличие кавитации и определить её активность. Однако, в этом направлении необходимы ещё очень широкие как теоретические, так и экспериментальные исследования.

#### **Список опубликованных работ**

1. Дежкунов, Н.В. Влияние изменения температуры жидкости на активность кавитации при УЗ очистке радиоэлементов / Н.В. Дежкунов, А.В. Красовский, В.В. Шаплыко // Материалы XIX международной научно-технической конференции «Современные средства связи». – Минск: УО «ВГКС», 2014. – с. 88.

2. Дежкунов, Н.В. Применение компьютерного моделирования для исследования механизма генерирования спектральных составляющих кавитационного шума / Н.В. Дежкунов, А.В. Красовский, В.В. Шаплыко // Материалы XIX международной научно-технической конференции «Современные средства связи». – Минск: УО «ВГКС», 2014. – с. 89.

3. Шаплыко, В.В. Исследование влияния температуры жидкости на активность кавитации / В.В. Шаплыко, А.В. Красовский, А.В. Котухов // международная научно-техническая конференция «Современные тенденции развития науки и производства». – Кемерово (Россия), 23-24.10.2014. – с. 145-148.

4. Красовский, А.В. Исследование кавитационного шума в ближнем и дальнем УЗ поле при помощи спектрального анализа / А.В. Красовский, В.В. Шаплыко // Материалы XVI международной научно-практической конференции «Техника и технологии: новые перспективы развития». – Москва: научный журнал «Педагогика и наука», 2015. – с. 43-46.

5. Шаплыко, В.В. Влияние газосодержания жидкости на активность кавитации при УЗ обработке изделий приборостроения / В.В. Шаплыко, А.В. Красовский // Материалы XVI международной научно-практической конференции «Техника и технологии: новые перспективы развития». – Москва: научный журнал «Педагогика и наука», 2015. – с. 47-50.