

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

*На правах рукописи*

УДК 532.528.2:534.321.9-026.73

ШАПЛЫКО  
Вячеслав Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ В НЕОДНОРОДНОМ  
УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ В ЖИДКОСТЯХ  
И СУСПЕНЗИЯХ НАНОЧАСТИЦ**

АВТОРЕФЕРАТ  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1–38 80 04 Технология приборостроения

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

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Дежкунов Николай Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент, зав.  
НИЛ 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Стемпичкий Виктор Романович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «22» июня 2015 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-87, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковые колебания находят все более широкое применение во многих отраслях 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 последние годы благодаря усилиям научных групп многих стран установлены новые многообещающие возможности применения мощного ультразвука, в частности, в звукохимии, медицине, электрохимии, при обработке пищевых продуктов.

При этом показано, что механизм воздействия ультразвука на физико-химические процессы в жидкостях имеет кавитационную природу, т.е. связан с явлением образования, пульсаций и захлопывания кавитационных полостей. Активность кавитации, понимаемая как интенсивность ее воздействия на тот или иной процесс, определяется концентрацией кавитационных полостей в единице объема жидкости и эффективностью преобразования пузырьками энергии ультразвука в другие виды энергии.

В НИЛ 5.2 БГУИР разработан конкурентоспособный на мировом рынке прибор для исследования активности кавитации - кавитометр. Опыт поставок прибора за последние два года в страны СНГ, Евросоюза и США показал, что рынок интенсивно расширяется и спрос растет. Потенциально, по совместной оценке БГУИР и фирмы Vandelin Electronics потребность европейского рынка может составить до 150 приборов в месяц при условии создания метрологического обеспечения кавитометра и введения единицы активности кавитации. Главным условием создания методики и установки для поверки кавитометров является обеспечение высокой воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания.

В связи с изложенным, в рамках магистерской диссертации была поставлена задача исследовать влияние различных факторов на активность кавитации и, на основании полученных результатов, разработать рекомендации по повышению воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания при ультразвуковой обработке.

Полученные результаты будут использованы в последующем при разработке установки для поверки кавитометров.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Исследование активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле в жидкостях и суспензиях наночастиц представляет собой довольно сложную задачу, т.к. процесс образования и схлопывания пузырьков происходит с большой скоростью (время захлопывания варьируется в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^8$  с) и размер пузырька предельно мал (варьируется от  $10^{-1}$  до  $10^{-3}$  мм). Также усложняет задачу тот факт, что активность кавитации зависит от множества факторов: свойств жидкости и ее температуры, концентрации зародышей кавитации и распределения их по размерам, характера отражения ультразвука на границе раздела фаз, объема рабочей жидкости, наличия обрабатываемых изделий в жидкости, акустической нагрузки на излучатель и многих других. Что сказывается на плохой воспроизводимости кавитационных режимов обработки ультразвуком. Также существует предположение, что на активность кавитации существенное влияние имеют наночастицы, добавленные в рабочую жидкость, так как они могут служить зародышами кавитации.

Поэтому не смотря на то, что кавитация интенсивно исследуется на протяжении нескольких десятилетий экспериментальных исследований по изучению влияния упомянутых выше параметров до сих пор проведено крайне мало. А данные имеющиеся в литературе часто характеризуются своей противоречивостью. Соответственно, надежно установить с какой точностью требуется поддерживать тот или иной параметр для обеспечения заданного уровня активности кавитации (с требуемой точностью) на основании известных данных не представляется возможным.

Метод оценки активности кавитации прибором «Кавитометр» основан на спектральном анализе акустического шума, так как все остальные 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 имеют 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. Анализ показывает, что кавитационный шум наиболее удобен для использования в качестве индикатора активности кавитации, поскольку акустический сигнал может быть достаточно просто преобразован в электрический.

### **Степень разработанности проблемы**

В последнее время усилиями исследователей выявлены новые возможности применения мощного ультразвука. Интенсивно расширяется его использование во многих областях науки и техники. В настоящее время общепризнано, что ключевым фактором ультразвуковой интенсификации физико-химических процессов в жидкостях является кавитация.

Построена математическая модель кавитационного пузырька на основе уравнения Нолтинга - Неппайраса, учитывающая влияние кавитационных пузырьков, составляющих кавитационный кластер. В качестве величины, характеризующей степень развитости кавитации, Л.Д. Розенбергом было предложено использовать индекс кавитации  $K$ .

Среди большого числа эмпирических исследований по этой теме необходимо отметить работы Т.Г. Лейтон, Ф. Каллигарис, В.А. Акуличев, Р. Кнэш, Дж. Дейли, Ф. Хэммит, И. Ф. Пирсол и др.

Кристиан Кох и Матиас Дж. в своей работе рассматривали влияние температуры на воспроизводимость кавитации. М. Гауптман и Ф. Фредерикс изучали возможность повышения активности кавитации за счет использования жидкости, перенасыщенной кислородом. Результаты данных исследований показали, что затруднительно выделить закономерности влияния исследованных параметров на активность кавитации, отмечается также большой разброс данных. Сиротюк М.Г. также рассматривал влияние температуры и газосодержания жидкости на кавитационные процессы. Дежкуновым Н.В. в работах по исследованию динамики развития кавитационной области были выделены три стадии.

Основным недостатком имеющихся знаний является их неоднозначность и зачастую их противоречивость. Предложенное исследование направлено на более дифференцированное и детальное изучение данных вопросов и установление новых закономерностей, исследования распределения активности кавитации по рабочему объёму.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является установление зависимостей

активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле от параметров, влияющих на свойства кавитационных полостей и кавитационной области в целом.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- проанализировать состояние вопроса и выделить факторы, влияющие на активность ультразвуковой кавитации;

- разработать экспериментальную установку и методику проведения измерений активности кавитации, установить закономерности распределения активности кавитации в объёме рабочей жидкости;

- установить зависимости активности кавитации от температуры, газо-содержания, наличия примесей, наночастиц в рабочей жидкости; оценить влияние свойств жидкости на активность кавитации; проанализировать полученные результаты и разработать рекомендации по повышению воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания при ультразвуковой обработке;

**Объектом** исследования является жидкости и суспензии наночастиц.

**Предметом** работы выступают физические процессы явления кавитации в жидкостях и суспензиях наночастиц.

**Область исследования** – физика мощного ультразвука. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1–38 80 04 «Технология приборостроения».

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Теоретическую основу диссертации составляют результаты исследований отечественных и зарубежных учёных в области ультразвука, кавитации и других эффектов, сопровождающих ультразвуковую обработку в жидкостях.

Проведение экспериментальных исследований активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле в жидкостях и суспензиях наночастиц осуществлялось на специально созданной в ходе работы над диссертацией экспериментальной установке, разработанной на базе НИЧ БГУИР НИЛ 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование».

Обработка статистических данных и построение графических зависимостей проводилось с использованием MS Excel. Также применялся па-

кет программ фирмы OriginLab Corporation для численного анализа данных и научной графики.

**Информационная база** для литературного анализа по данной теме сформирована на основе более ранних наработок и исследований в этой области.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в интеграции теоретических, экспериментальных данных для получения более точных сведений о динамике активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле а также в более детальном изучении природы данного явления.

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

1. Закономерности распределения активности кавитации в объеме рабочей жидкости. Показано, что девиация резонансной частоты излучателя от частоты генератора не существенно влияет на воспроизводимость измерений в кавитирующей жидкости.

2. Зависимости активности кавитации от температуры жидкости и показано, что вид температурной зависимости не является одинаковым для различных точек поля. В частности, в точках максимума звукового давления активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в точках минимума – активность кавитации вначале растет с ростом температуры, достигает некоторой максимальной величины и затем начинает уменьшаться.

3. Показано, что введение наночастиц в жидкость приводит к увеличению активности кавитации в точках минимума звукового давления. Рекомендации по повышению воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания при ультразвуковой обработке и диапазоны допустимых вариаций основных параметров для обеспечения заданной точности воспроизведения кавитационных режимов озвучивания

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что полученные результаты позволяют более детально изучить процесс возникновения, роста и развития кавитационной области, более глубоко изучить природу явления кавитации и другие процессы, происходящие в жидкости под действием ультразвука.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что полученные результаты и предложенные рекомендации могут существенно повысить воспроизводимость кавитационных режимов при ультразвуковой обработке, их

использование будет способствовать созданию метрологического обеспечения кавитометра.

#### **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 шести опубликованных работах общим объемом 13,0 п.л. (авторский объем 10,0 п.л.).

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 81 страниц. Работа содержит 29 рисунков. Библиографический список включает 57 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы исследования активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле, 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 и тенденции развития исследования активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле. Приводится краткая характеристика исследуемой области. Проанализированы основные процессы при генерировании кавитации в ультразвуковом поле и методы исследования активности кавитации. Рассмотрены физико-химические свойства жидкости, влияющие на активность кавитации.

**Во второй главе** представлены экспериментальные исследования распределения активности кавитации в неоднородном ультразвуковом поле. В частности представлена экспериментальная установка и методика исследований активности кавитации. Представлены исследования, которые графически показывают распределения активности кавитации по объёму рабочей жидкости. Также изучено влияние неконтролируемой девиации частоты на активность кавитации.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния свойств рабочей жидкости и наличия примесей на активность кавитации. Показано исследование активности кавитации в суспензиях наночастиц и сделан вывод о влиянии наличия наночастиц в рабочей жидкости на активность кавитации. Проведен анализ полученных результатов и представлены рекомендации по повышению воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания при ультразвуковой обработке.

**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 натурных 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.

Выделены основные факторы, влияющие на активность кавитации. Разработана экспериментальная установка и методика проведения измерений активности кавитации.

Установлены закономерности распределения активности кавитации в рабочем объёме жидкости. Установлены зависимости активности кавитации от температуры жидкости, впервые показано, что вид температурной зависимости не является одинаковым для различных точек поля. В частности, в точках максимума звукового давления активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в точках минимума – активность кавитации вначале рас-

тет с ростом температуры, достигает некоторой максимальной величины и затем начинает уменьшаться. Показано, что дегазация жидкости позволяет повысить активность кавитации в некоторых случаях более, чем в 10 раз.

Также в работе показано, что введение наночастиц в жидкость приводит к увеличению активности кавитации в точках минимума звукового давления. Разработаны рекомендации по повышению воспроизводимости кавитационных режимов озвучивания при ультразвуковой обработке.

Подобного рода исследования до сих пор проводились с использованием методов, позволяющих определить лишь интегральную активность кавитации. А распределение активности кавитации по объему рабочей жидкости практически не рассматривалось, хотя ультразвуковые волны распространяются не равномерно как в жидких так и в твердых средах, следовательно и сама кавитация распределяется так же не равномерно. Поэтому прогнозировать влияние различных факторов на активность кавитации по всему объему, в силу малой изученности вышеизложенных факторов, не представлялось возможным.

Проведенные исследования в настоящее время являются очень актуальными. Многие закономерности, установленные в ходе проведения исследований, имеют большую научную значимость.

Существенная часть диссертации была выполнена во время стажировки в МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва, РФ).

#### **Список опубликованных работ**

1. Dezhkunov, N. V. Devices for the HIFU cavitation monitoring / N. V. Dezhkunov, F. Calligaris, A. V. Kotukhov, V. A. Shaplyca // Book of abstracts of international conference Forum Acusticum -2014. Krakow, 7-12 Sept. 2014. P. 180.
2. Дежкунов, Н. В. Влияние изменения температуры жидкости на активность кавитации, при ультразвуковой 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.
3. Дежкунов, Н. В. Применение компьютерного моделирования для исследования механизма генерирования 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.
4. Шаплыко, В. В. Исследование влияния температуры жидкости на

активность кавитации / В. В. Шаплыко, А. В. Красовский, А. В. Котухов, Н. В. Дежкунов // Международной дистанционной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства» – Кемерово, Россия, 23-24 октября 2014. – С. 145-148.

5. Красовский, А.В. Исследование кавитационного шума в ближнем и дальнем ультразвуковом поле при помощи спектрального анализа / А.В. Красовский, В.В. Шаплыко // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Техника и технология: Новые перспективы развития» - Москва, Научный журнал «Педагогические науки», 20 февраля 2015. – С. 43-46.

6. Шаплыко, В.В. Влияние газосодержания жидкости на активность кавитации при ультразвуковой обработке изделий приборостроения / В.В. Шаплыко, А.В. Красовский // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Техника и технология: Новые перспективы развития» - Москва, Научный журнал «Педагогические науки», 20 февраля 2015. – С. 47-50.

Библиотека БГУИР