

## ОТЗЫВ

Официального оппонента д.ф.-м.н., доцента А.А. Карабутова  
на диссертацию Анненковой Елены Александровны  
«Нелинейная динамика пузырьков и капель под воздействием  
интенсивных акустических волн», представленную на соискание  
учёной степени кандидата физико-математических наук  
(специальность 01.04.06 – «Акустика»)

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация Анненковой Е.А. посвящена анализу процессов в парогазовых пузырях и жидких каплях акустических фонтанов, образующихся в жидкостях и мягких тканях при ультразвуковой диагностике и терапии. В работе исследуется возможность акустического измерения размеров пузырьков газа порядка разрешающей способности ультразвукового сканера, анализируется характер роста пузырей, находящихся в перегретой фокальной области ультразвукового пучка при терапии и изучаются нелинейные процессы внутри капель акустического фонтана..

В настоящее время медицинский ультразвук имеет широкое применение благодаря его способности разрушать и модифицировать ткань при высоких амплитудах ультразвуковых волн. Среди механизмов разрушения выделяются акустическая кавитация – образование газовых пузырьков; достижение температуры кипения в фокальной области действия ультразвука, которая провоцирует образование паровых полостей; генерация микрофонтанов на границе раздела газовой среды и ткани, приводящая к атомизации. Данные явления ещё мало изучены, так как сопровождаются сложными акусто-гидродинамическими и тепловыми эффектами, но исследования этих процессов имеют высокую важность, так как существует ряд областей применения, в которых описанные явления могут повысить эффективность. В частности, в области неинвазивной диагностики и терапии они позволят усовершенствовать медицинские приборы, использующие

мощный фокусированный ультразвук. Таким образом, тема данной диссертации без сомнения является актуальной.

### **Новизна основных выводов и результатов работы**

Новизна основных выводов и результатов диссертационной работы состоит в том, что соискатель впервые рассмотрел нелинейную динамику парогазовых пузырей в малой перегретой области. Впервые рассмотрены нелинейные стоячие волны в жидких каплях, возникающих в акустических фонтанах. Оригинальный характер носят также результаты теоретического исследования параметрической неустойчивости колебаний поверхности акустически возбужденной жидкой сферы.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Все основные выводы, научные положения и рекомендации, сформулированные автором в тексте диссертации и автореферата, в достаточной мере обоснованы и являются научными фактами.

**Достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, а также экспериментальной проверкой разработанных методов на опытных образцах из пенопласта, являющихся моделями парогазовых пузырьков в жидкости. Достоверность всех этих результатов не вызывает сомнений.

### **Ценность для науки и практики**

Ценность данной диссертационной работы для науки и практики состоит в разработке теоретической модели нелинейного акустического резонатора сферической формы, которая является фундаментальной задачей, имеющей аналоги в различных областях акустики помимо капель акустического фонтана. Другой возможной областью применения результатов работы является ультразвуковой мониторинг возникновения кипения в мягких биотканях в процессе их нагрева проникающим излучением.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему,

направленную на исследование нелинейной динамики парогазовых пузырей и жидких капель под воздействием интенсивных акустических волн, применяемых в ультразвуковой диагностике и терапии. Результаты диссертационной работы обсуждались на многих международных и российских конференциях по нелинейной акустике и медицинскому ультразвуку. У соискателя имеется необходимое количество статей в журналах Web of Science, RSCI и Scopus. Опубликованные работы в полной мере отражают основные результаты диссертации. Автореферат корректно отражает ее основное содержание.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, списка публикаций по теме диссертации и списка использованной литературы.

Во введении описана актуальность работы, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В **первой главе** проведён обзор терапевтических ситуаций, в которых могут образовываться парогазовые пузыри в мягких тканях, а также описана важность диагностирования таких пузырей и их размеров. Представлена оригинальная экспериментальная установка по получению диаграмм рассеяния модели мягкой сферы, которые сопоставляются с теоретическими диаграммами рассеяния абсолютно мягкой неподвижной сферы. Описаны результаты экспериментов по ультразвуковой визуализации пенопластовых моделей пузырьков газа в модели биоткани – желатине.

Во **второй главе** произведена постановка задачи нелинейной динамики роста парогазового пузыря в перегретой области конечного размера и составлены уравнения для температуры на границе пузыря на основе решения задачи теплопроводности в жидкости. Выполнены расчеты роста пузыря с учетом парообразования и теплопроводности, а также кривых акустического давления данного пузыря в жидкости с разными степенями перегрева для разных начальных условий.

**В третьей главе** представлена теоретическая модель динамики в капле акустического фонтана, основанная на волновом уравнении для потенциала колебательной скорости акустического поля с учётом квадратично-нелинейных членов. Находится решение поставленной задачи методом медленно изменяющихся амплитуд. Описаны результаты численных экспериментов по построению акустического поля в капле, в том числе для практического примера по наблюдению капель при генерации акустического фонтана в воде.

**В четвёртой главе** проведён анализ кавитационных, тепловых и неустойчивых явлений в капле акустического фонтана на основе представленной в третьей главе теоретической модели. Обнаружено, что в условиях, характерных для капель акустического фонтана, приращение температуры в центре капли составляет лишь доли градуса. При этом расчёты пикового давления в центре капли показали, что порог кавитации достигается спустя уже несколько миллисекунд. Рассчитаны границы зон неустойчивости решения уравнения для амплитуды возмущения поверхности капли, которые можно использовать для анализа достижения неустойчивого режима на поверхности капли.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** подробно описан вывод формул для описания сферически симметричного нелинейного акустического поля в сферическом резонаторе с мягкой границей.

В целом по итогам рассмотрения текста диссертации и автореферата складывается благоприятное впечатление о данной диссертационной работе, как с точки зрения уровня проведённых исследований, так и полученных автором научных результатов. Стиль изложения материалов диссертации – чёткий, диссертация и автореферат хорошо иллюстрированы. На основании изучения материалов диссертации можно констатировать достаточно высокий уровень квалификации соискателя, включая способность получать и

анализировать результаты проведенных научно-исследовательских работ.

Несмотря на положительную в целом оценку данной диссертационной работы, переходя **к замечаниям по тексту диссертации**, следует отметить сначала ряд замечаний общего характера:

1. В тексте диссертации отсутствует единообразие в оформлении рисунков и схем экспериментальных установок.
2. Анализ современного состояния исследований в данной области является достаточно кратким. В целом он дает представление о современном состоянии, но представленное описание могло быть более детальным и информативным применительно к рассматриваемой тематике.
3. В автореферате (стр.2) говорится о высокоинтенсивных коротких ультразвуковых импульсах миллисекундной длительности. Представляется, что имеются в виду импульсы микросекундной длительности.

Переходя **к замечаниям по существу работы**, необходимо отметить следующее.

1. В первой главе диссертационной работы говорится о возможности применения пенопластовых образцов в качестве моделей воздушных объектов, обусловленной результатами экспериментов по анализу отражательных свойств пенопласта. Однако эксперименты были проведены лишь для сферических образцов, что не позволяет обобщать выводы на образцы любой формы.
2. Поскольку пенопласт является средой с большой пористостью, то остается открытым вопрос, были ли поры, выходящие на поверхность открытыми или закрытыми? Имело ли место влагонасыщение образца, измерялась ли масса образца до измерений и после?
3. Во второй главе неясным остается вопрос, насколько сильно влияет конечность перегретой области, в которой находится парогазовый зародыш, на его рост. Также выведена система уравнений,

описывающих процесс роста, и предложен метод её численного моделирования, но результаты моделирования представлены не в полной мере.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.06 – «акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Анненкова Елена Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – «акустика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
профессор Международного  
учебно-научного лазерного центра  
МГУ имени М.В. Ломоносова



А.А. Карабутов

15.05.2018г.

**Дата подписания**

Адрес места работы:

119991, Москва, ул. Ленинские горы 1, стр. 62  
Международный учебно-научный лазерный центр МГУ имени М.В.  
Ломоносова

Тел.: +7 (495) 939-5309; e-mail: aak@optoacoustic.ru

Подпись профессора МЛЦ МГУ имени М.В.Ломоносова Карабутова Александра  
Алексеевича удостоверяю:

Секретарь Ученого Совета МЛЦ МГУ



Набережных А.Р.