

## ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе Кияшко Сергея Борисовича

«ЭВОЛЮЦИЯ ПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН В МИКРОНЕОДНОРОДНЫХ  
СРЕДАХ С СИЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Диссертационная работа Кияшко С.Б. посвящена теоретическому исследованию нелинейных волновых процессов и выявление закономерностей распространения продольных упругих волн в микронеоднородных твердых телах, обладающих сильной акустической нелинейностью (реактивной, диссипативной, гистерезисной). Эта тема актуальна для задач современной акустики, в которых все большее внимание уделяется изучению нелинейных волновых процессов в средах, акустическая нелинейность которых является аномально-высокой по сравнению со слабо-нелинейными однородными твердотельными средами. Актуальность этих вопросов во многом определяется тем, что “классическая” пяти (или девяти) константная теория упругости, призванная описывать слабо-нелинейные однородные твердотельные среды, не объясняет закономерностей нелинейных волновых процессов, наблюдаемых в экспериментах с сильно-нелинейными микронеоднородными средами, поэтому возникают задачи о создании физических моделей микронеоднородных сред с сильной акустической нелинейностью, получении их уравнений состояния и (по возможности) точных или приближенных аналитических и численных решений нелинейных волновых уравнений для сред с различного вида неаналитическими уравнениями состояния.

Диссертация Кияшко С.Б. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель работы, ее научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту и кратко излагается содержание диссертации.

**В первой главе** предложена модель микронеоднородной среды - пористого водоподобного материала, содержащего систему цилиндрических капилляров, частично заполненных вязкой жидкостью, получено ее нелинейное динамическое уравнение состояния и проведено теоретическое исследование нелинейных волновых процессов в такой среде. Показано, что такая трехфазная среда обладает сильной акустической нелинейностью и содержит релаксационные реактивную и диссипативную составляющие, обусловленные нелинейной зависимостью капиллярного и вязкого давлений в жидкости от

диаметра капилляра. Определены оптимальные соотношения физических и геометрических характеристик среды, при которых параметры ее акустической нелинейности максимальны. Проведено теоретическое исследование эффектов генерации второй гармоник и волны разностной частоты, самодемодуляции высокочастотных импульсов, изменения скорости распространения и коэффициента поглощения пробной волны под действием однородной статической нагрузки. Определены частотные зависимости эффективных параметров квадратичной нелинейности среды для этих эффектов и показано, что с ростом частоты акустической волны нелинейность среды уменьшается. Полученные результаты могут иметь прикладное значение в медицинской акустике (для нелинейной диагностики мягких биологических тканей), и в материаловедении (при создании искусственных сильно нелинейных материалов, с целью повышения эффективности параметрических излучателей звука апертурного типа).

**Во второй главе** проводится теоретическое исследование распространения плоских продольных акустических волн в диссипативных и релаксирующих средах с разномодульной нелинейностью. Интерес к такой задаче и ее специфика связаны с линейной зависимостью разномодульной нелинейности от амплитуды деформации, что позволяет получить точные аналитические решения нелинейных волновых уравнений для таких сред. Для разномодульной среды с вязкой диссипацией найдены самоподобные решения и предложен спектральный метод для численного расчета эволюции волны. Для однородной разномодульной среды с релаксацией также найдены самоподобные решения и предложен спектральный метод для расчета эволюции первоначально гармонических волн. Для микронеоднородной разномодульной среды с релаксацией получены самоподобные решения для низкочастотных и высокочастотных волн. Численным методом исследована эволюция первоначально гармонических НЧ волн и показано, что в процессе распространения волны ее форма стремится к самоподобной. Полученные результаты могут найти применение при создании нелинейных методов акустической диагностики разномодульных сред, в частности, конструкционных материалов, содержащих трещины.

**В третьей главе** рассматривается распространение периодических волн и импульсных возмущений в безграничных средах и резонаторах с гистерезисной нелинейностью, в том числе и с насыщением нелинейных потерь. Определены характеристики нелинейных волн в таких средах: амплитудно-зависимые декремент затухания и изменение скорости распространения волны и амплитуды высших гармоник первичной волны. Амплитудные зависимости нелинейных эффектов свидетельствуют о различной динамике волновых процессов в средах и в резонаторах с упругим и неупругим гистерезисами. Показано, что среды с упругим гистерезисом обладают нелинейной

дисперсией (в отличие от сред с гистерезисом неупругим). Проведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований нелинейных эффектов амплитудно-зависимого внутреннего трения (АЗВТ) в резонаторе из отожженной поликристаллической меди, где имеет место насыщение нелинейных потерь и определены эффективные параметры упругого и неупругого гистерезисов для этого металла. Показано, что упругий гистерезис адекватно описывает эффекты амплитудно-зависимого внутреннего трения и генерацию третьей гармоники в резонаторе из отожженной меди, а описание этих же эффектов в рамках неупругого гистерезиса приводит к количественному несоответствию с амплитудой третьей гармоники, генерируемой в резонаторе.

Основные выводы и положения представляются достоверными и обоснованными. Это подтверждается хорошим соответствием результатов теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальных исследований. Насколько можно судить из текста диссертации и автореферата, все основные результаты получены лично автором, а его личный вклад описан достаточно подробно. Необходимо отметить, что диссертант показал владение различными методами теоретического анализа и компьютерного моделирования нелинейных волновых процессов в средах с сильно акустической нелинейностью. Это характеризует его как высококвалифицированного специалиста-акустика.

По теме диссертации Кияшко С.Б. было подготовлено и опубликовано 17 работ, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК. Полученные результаты неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях по радиофизике и акустике.

Диссертационная работа содержит общее введение, три оригинальные главы, заключение и список литературы. Объем работы составляет 123 страницы и включает 63 рисунка, список литературы содержит 92 наименования. Автореферат работы представлен на 22 страницах.

По тексту диссертации можно, однако, сделать ряд замечаний.

Глава 2 посвящена акустическим волнам в диссипативных и релаксирующих средах с разномодульной нелинейностью. Здесь возникают два вопроса, которые требуют пояснения:

1. Почему в разномодульной среде амплитуды 2-й и 4-й гармоник на малых расстояниях растут линейно (от расстояния), а амплитуда 3-й гармоники - квадратично?
2. В чем принципиальное отличие реализации спектрального метода расчета профиля волны для диссипативных сред с квадратичной и разномодульной нелинейностями?

