

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.

Нелинейная акустика является одним из традиционных направлений, развиваемых нижегородской радиофизической школой. Именно в Нижнем Новгороде была предложена идея использования нелинейного взаимодействия высокочастотных акустических волн с близкими частотами для создания параметрических антенн направленного низкочастотного излучения в воде. В последнее время интенсивно развиваются исследования волновых процессов в микронеоднородных твердотельных средах, обладающих сильной акустической нелинейностью. К подобным средам относятся многие поликристаллические горные породы, металлы, гранулированные среды, грунты и некоторые искусственные материалы, например, бетоны и керамики. Наличие в структуре таких сред различных нелинейных включений или дефектов в виде дислокаций, трещин, полостей, зерен и т.д. является причиной их сильной акустической (реактивной, гистерезисной, диссипативной) нелинейности, что, в основном, и определяет эффективность нелинейных взаимодействий акустических волн в таких средах. Разнообразие нелинейных акустических эффектов в микронеоднородных средах представляет несомненный физический интерес, а также позволяет создавать новые эффективные методы их диагностики и неразрушающего контроля.

В кандидатскую диссертацию С.Б. Кияшко вошли результаты теоретических исследований нелинейных волновых процессов в микронеоднородных твердых телах, описываемых уравнениями состояния с различными видами нелинейности. Следует отметить достаточно высокий уровень этой работы. Диссертация включает в себя пример построения физической модели микронеоднородной среды и соответствующего нелинейного динамического уравнения состояния, нахождение новых аналитических решений для сред с разномодульной нелинейностью, выявление отличий в закономерностях проявления волновых явлений в средах с классической квадратичной, разномодульной и гистерезисной нелинейностями. Исследования проводились с использованием как теоретических, так и численных методов решения нелинейных волновых уравнений. По теме диссертации автором было подготовлено и опубликовано 17 работ, в том числе 10 статей в рецензируемых журналах,

входящих в список ВАК. Полученные результаты прошли апробацию на профессиональных 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.

Содержание введения фактически повторяет автореферат работы. Дается краткий обзор современного состояния исследований по нелинейной акустике микронеоднородных сред, 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 получено уравнение состояния пористого водоподобного материала, содержащего систему капилляров, частично заполненных вязкой жидкостью. Новым аспектом здесь, по сравнению с полученными ранее результатами, является учет эффектов вязкости. Показано, что такая среда обладает сильной реактивной и диссипативной нелинейностями релаксационного типа, обусловленными нелинейной зависимостью капиллярного и вязкого давлений в жидкости от диаметра капилляра. Получено нелинейное эволюционное волновое уравнение, описывающее однонаправленное распространение волн в такой среде. Показано, что в низкочастотном приближении уравнение переходит в известное уравнение Бюргерса. Далее, в квазилинейном приближении исследуются классические нелинейные явления: генерация второй гармоники и волны разностной частоты, демодуляция высокочастотных импульсов и амплитудно-фазовые эффекты, возникающие при распространении гармонической волны в поле статической нагрузки. Находятся частотные зависимости эффективных параметров квадратичной нелинейности среды для рассмотренных эффектов.

Во второй главе исследуется распространение акустических волн в диссипативных и релаксирующих средах с разномодульной нелинейностью, в которых упругие модули сжатия и растяжения отличаются друг от друга, при этом используются как теоретические, так и численные методы. Ранее было известно, что в отсутствие диссипации, за счет различных скоростей распространения фаз сжатия и растяжения волны в таких средах, разрывные фронты в ее профиле образуются уже на сколь угодно малых расстояниях от излучателя. Ожидалось, что, как и в квадратично-нелинейной среде, эффекты диссипации, могут сгладить возникающие особенности в виде разрывов. В работе удается получить автоматические аналитические решения одномерного нелинейного эволюционного уравнения для

импульсных и периодических волн в диссипативных и релаксирующих средах с разномодульной нелинейностью. Так, при учете вязкости, получено стационарное решение в виде симметричного скачка с шириной перехода, не зависящей, в отличие от уравнения Бюргера, от амплитуды волны. Далее используется численное моделирование для исследования особенностей распространения исходно гармонической волны с учетом либо вязкости, либо релаксации. Показано, что при распространении гармонической волны в разномодульной среде с вязкостью происходит образованию автомодельного профиля на каждом из ее периодов, при этом профили таких волн не содержат неоднозначностей. Полученные результаты обобщаются для разномодульных микронеоднородных сред. Показано, что в микронеоднородных средах, характеризующихся дисперсией нелинейности, профили акустических волн не содержат неоднозначностей, в то время как в однородной среде с безынерционной нелинейностью и релаксацией распространение волн (достаточно высоких частот) может сопровождаться образованием неоднозначности их профиля. Результаты численного моделирования распространения исходно гармонических волн показывают, что их эволюция в таких средах приводит к образованию самоподобных волн.

В третьей главе рассматривается распространение периодических волн и импульсных возмущений в безграничных средах и резонаторах с гистерезисной нелинейностью. Вначале проводится сравнительный анализ распространения и эволюции периодической пилообразных волн в недиспергирующих средах с квадратичной нелинейностью и с упругим и неупругим квадратичными гистерезисами, для которых соответственно $\sigma(\varepsilon = 0) = 0$ и $\sigma(\varepsilon = 0) \neq 0$, $\varepsilon(\sigma = 0) \neq 0$. Получены точные решения, описывающие эволюцию пилообразных волн и их спектральных характеристик в недиспергирующих средах с квадратичной упругой и гистерезисной нелинейностью. Показано, что, в отличие от сред с квадратичной нелинейностью и неупругим гистерезисом, среды с упругим гистерезисом обладают нелинейной дисперсией фазовой скорости. Далее, на основе анализа результатов экспериментальных исследований эффектов амплитудно-зависимого внутреннего трения в поликристаллах предложены модифицированные гистерезисные уравнения состояния, учитывающие насыщение нелинейных потерь. Получены точные решения, описывающие распространение однополярных импульсных возмущений и периодических волн в таких средах. Определены нелинейные декремент затухания и скорость распространения волны на основной частоте, а также закономерности для амплитуд и фазовых скоростей ее высших гармоник. Получены выражения для нелинейных потерь, сдвига резонансной частоты и амплитуд колебаний на частотах второй и третьей гармоник для стержневого резонатора с упругим и

неупругим гистерезисами с насыщением гистерезисных потерь. Из сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований нелинейных эффектов в резонаторе из отожженной поликристаллической меди определены параметры гистерезисной нелинейности 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 положения и выводы работы представляются достоверными и обоснованными. Это подтверждается хорошим соответствием результатов теоретического анализа известным предельным случаям решений более простых моделей, результатов численного моделирования существующим аналитическим решениям и данным экспериментальных исследований. Судя по диссертации и автореферату, все основные результаты получены лично автором, а его личный вклад описан достаточно подробно. Автор диссертации показал владение различными методами теоретического анализа и компьютерного моделирования нелинейных волновых процессов в средах с неаналитическими уравнениями состояния. Это характеризует его как высококвалифицированного специалиста.

По работе имеется несколько замечаний.

1. В Главе 1, при рассмотрении модели водоподобного материала с системой капилляров предполагается неподвижность линии трехфазного контакта газ-жидкость-твердое тело на поверхности капилляра. Необходимо объяснить, на чем основано данное предположение. Кроме того, связь самой модели и ее возможного использования в прикладных задачах медицинской акустики и материаловедения остается непонятной и нуждается в пояснении.

2. При представлении материала диссертации часто не уделяется внимания разделению известных и полученных автором результатов. Так, в Главе 3, на стр.71-73 описывается классическая задача искажения одного периода волны треугольной формы в квадратично-нелинейной среде и превращение ее в пилообразную волну, при этом не приводится никаких ссылок. Список цитированной литературы во многом состоит из более ранних работ научного руководителя автора. Связь методов, используемых в работе, и полученных результатов с исследованиями, проводимыми другими научными группами, несомненно усилило бы теоретические выводы работы.

3. Имеется ряд опечаток, как, например: «метод для численного расчета» (с. 66).

Тем не менее, отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки представленной диссертационной работы. Развитые в работе методические подходы при получении нелинейных уравнений состояния микронеоднородных сред и найденные аналитические решения нелинейных волновых уравнений обладают оригинальностью, полученные численные решения позволили выявить ряд новых особенностей нелинейных взаимодействий в средах с сильной акустической нелинейностью. Полученные физические результаты имеют как научное, так и практическое значение.

В целом диссертационная работа Сергея Борисовича Кияшко является законченным научным исследованием, научная новизна и достоверность результатов которого не вызывают сомнений. Все основные результаты диссертации опубликованы в профильных научных изданиях. Автореферат и публикации автора достаточно полно передают содержание и основные выводы работы. Считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям пунктов 9 – 14 “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Кияшко Сергей Борисович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук, доцент (научн. звание)
доцент кафедры акустики физического факультета
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

/В.А. Хохлова/

Адрес: Вера Александровна Хохлова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
Тел. +7(495)939-29-52
E-mail: vera@acs366.phys.msu.ru

Декан физического факультета
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова
профессор



/Н.Н. Сысоев/