

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н., доцента Савицкого Олега Анатольевича о диссертационной работе Квашенниковой Анастасии Валерьевны «Численное моделирование генерации волны разностной частоты в трёхмерных ультразвуковых пучках в условиях сильного проявления нелинейности среды», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Диссертационная работа А.В. Квашенниковой посвящена разработке методов пространственно трехмерного численного моделирования нелинейных волновых процессов применительно к исследованиям поля параметрических источников звука.

Низкочастотное излучение, формирующееся в квадратично-нелинейных водоподобных средах в поле источника амплитудно-модулированных волн конечной амплитуды, получившее название параметрического, обладает рядом уникальных свойств, делающих параметрические антенны привлекательным инструментом исследования акустически прозрачных сред. К таким свойствам относятся бестелесность, широкополосность, высокая направленность низкочастотного излучения с малым уровнем бокового поля при малых габаритах первичного преобразователя.

Создание параметрических антенн и гидролокаторов на их основе актуально для гидролокации в условиях мелкого моря, поскольку позволяет реализовать энергетически эффективный режим маломодовой локации. В глубоком море параметрические антенны позволяют обеспечить селективное возбуждение отдельных водных лучей, что может существенно повысить дальность гидролокации и повысить помехоустойчивость дальней гидроакустической связи.

Несмотря на достаточно высокую степень проработанности теории параметрических антенн, сложность нелинейных волновых процессов в пространственно трехмерных полях модулированных волн конечной амплитуды требует развития такого инструмента теоретических исследований, как математическое моделирование. Более широкое применение методов математического моделирования послужит лучшему пониманию закономерностей нелинейного формирования и распространения излучения в низкочастотной области спектра, в особенности в неоднородных акустически прозрачных средах.

Представленная диссертация как раз и является попыткой создания инструмента исследования нелинейных режимов генерации низкочастотного излучения и его распространения в акустически неоднородных средах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 123 страницы, 44 рисунка, 3 таблицы и 124 библиографические ссылки.

Во **введении** к диссертационной работе обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследуемой проблемы, приводится краткий обзор современных достижений, сформулированы цели и задачи ра-

боты, а также описывается ее краткое содержание по главам.

Первая глава содержит литературный обзор известных теоретических результатов, полученных при решении задачи о нелинейных взаимодействиях в поле параметрического излучателя.

Приведено модельное уравнение Вестервельта, учитывающее эффекты нелинейности, дифракции и поглощения, а также уравнение Хохлова-Заболотской-Кузнецова (ХЗК) – параболическая аппроксимация уравнения Вестервельта для узконаправленных пучков.

Так как исследование процессов генерации и распространения волны разностной частоты (ВРЧ) в общем случае затруднительно, то имеющиеся аналитические результаты получены с учетом различных упрощающих предположений при описании нелинейных и дифракционных эффектов.

Рассмотрена первая, предложенная П. Вестервельтом теоретическая модель, позволяющая получить аналитические оценки для характеристик генерируемого излучения на разностной частоте в дальнем поле параметрического излучателя. Рассмотрен ряд простейших решений нелинейно-дифракционных задач для амплитуды давления волны разностной частоты (ВРЧ), полученных методом последовательных приближений, без и с учетом диссипативных эффектов. Отмечены основные закономерности пространственного поведения амплитуды ВРЧ и указаны границы применимости асимптотических решений. Приведены известные результаты квазилинейной теории Берктея для профиля демодулированной низкочастотной волны, генерируемой при различных видах модуляции волны накачки.

Выполнен обзор существующих численных алгоритмов для описания нелинейных взаимодействий в поле параметрического излучателя в спектральном, временном и комбинированном представлениях.

Во **второй главе** рассмотрены различные подходы к численному описанию нелинейных взаимодействий плоских волн накачки, при этом рассматривается как двухчастотное параметрическое взаимодействие с генерацией волны разностной частоты, так и эффект нелинейной демодуляции высокочастотной импульсной накачки.

Рассмотрены особенности и трудности спектрального и временного представлений при аппроксимации нелинейных членов модельных уравнений. При образовании ударных фронтов в профиле двухчастотной волны накачки число спектральных компонент для корректной аппроксимации увеличивается пропорционально отношению частоты волн накачки к разностной частоте и составляет несколько тысяч или даже десятков тысяч. Это сильно затрудняет вычисления, особенно в трехмерной постановке задачи, поскольку количество операций в спектральном алгоритме пропорционально квадрату числа гармоник.

Автором рассмотрены различные методы оптимизации нелинейного спектрального алгоритма путем прореживания спектра для обеспечения возможности решения задачи в трехмерной постановке в разумное время и с минимальными затратами на требуемую память.

Предложен метод ограничения числа спектральных компонент в системе

нелинейных алгебраических уравнений, который состоит в пороговой режессии высокочастотных компонент спектра, которые сосредоточены вблизи гармоник и волн комбинационных частот волн накачки. Показано, что можно сократить число удерживаемых в нелинейном спектральном алгоритме гармоник разностной частоты с тысяч нескольких десятков. При этом ошибка в расчете амплитуды давления ВРЧ вплоть до 10 длин образования разрыва составляет 2–3%.

Автором диссертационной работы рассмотрен также временной подход к решению уравнения Бюргерса как альтернатива для импульсной накачки с широким спектром, где количество спектральных компонент возрастает в десятки раз по сравнению с двухчастотным возбуждением. Временной алгоритм разработан на основе шеститочечной консервативной удароулавливающей схемы типа Годунова, выигрышной для описания разрывных режимов, так как требует использования всего лишь 2–3 временных узлов численной сетки на разрыв в одномерных и 7–8 узлов в трехмерных задачах против порядка 50 в существующих алгоритмах. Проведена верификация временного алгоритма путем сравнения со спектральным методом и показана его выигрышность с точки зрения времени работы в сотни раз по сравнению с полным спектральным и в несколько раз относительно спектрального алгоритма с частотной фильтрацией.

Развитый автором временной подход позволяет исследовать особенности нелинейной самодемпирования высокочастотных импульсов произвольной формы в различных режимах распространения.

В третьей главе исследуется трехмерная дифракционная задача о генерации волны разностной частоты в квазилинейном приближении с учетом дифракции, как волн накачки, так и ВРЧ, в обоих поперечных направлениях x и y . Описан численный спектральный алгоритм решения трехмерного уравнения ХЗК. Задача сводится к решению двух линейных уравнений для волн накачки и неоднородного линейного уравнения для ВРЧ с функцией источников в правой части.

Дифракционная задача рассматривалась для реалистичных начальных условий на излучателе в виде многоэлементной антенной решетке эллипсоидальной формы с двумя каналами излучения волн накачки при равномерном распределении колебательной скорости на поверхности отдельных элементов. Приведены результаты квазилинейного моделирования.

Проводится сравнение полученных для амплитуды давления ВРЧ численных результатов с приближенными аналитическими моделями, приведенными в главе 1. Аналитические модели верно описывают поведение амплитуды ВРЧ только в ближнем поле на оси пучка, однако не могут быть использованы на больших расстояниях.

Четвёртая глава посвящена решению трехмерной нелинейной задачи о генерации волны разностной частоты при двухчастотной накачке в разрывных режимах в свободном пространстве. Описан численный спектральный алгоритм решения уравнения ХЗК в полной нелинейной постановке с проре-

живанием частотных компонент. При этом вводилось дополнительное искусственное увеличение коэффициента поглощения.

Приводятся результаты расчета коэффициента преобразования амплитуды волн накачки в амплитуду ВРЧ. Максимальное отношение амплитуды ВРЧ к начальной амплитуде давления волн накачки достигает 0.66% при самом высоком значении разностной частоты (15 кГц), рассматриваемом в моделировании. Показателем эффективности принята зависимость нормированной амплитуды ВРЧ p_{dif}/p_0 на оси пучка от амплитуды давления на излучателе p_0 (эффективность) на различных расстояниях. Другим показателем эффективности может служить процент от общей акустической мощности, трансформируемой от волн накачки в волну разностной частоты. Этот процент увеличивается с увеличением мощности излучателя без эффекта насыщения. Для наибольшего значения $f_{\text{dif}} = 15$ кГц при $z = 50$ м такой коэффициент передачи составляет 0.002%, 0.03% и 0.05% от общей начальной мощности волн накачки, которая составляла 0.023 кВт, 0.58 кВт и 2.3 кВт для $p_0 = 0.06$ МПа, 0.3 МПа и 0.6 МПа, соответственно.

Показано, что генерация низкочастотного излучения на разностной частоте происходит эффективнее при больших начальных давлениях и, следовательно, мощностях на параметрическом излучателе, при которых реализуются сильно нелинейные режимы распространения волн, что существенно отличается от поведения высших гармоник, амплитуды которых насыщаются с ростом давления на излучателе.

Сделан вывод о том, что численное моделирование параметрических процессов служит удобным инструментом для количественных оценок уровней сгенерированного низкочастотного излучения при сохранении желаемой направленности.

Пятая глава посвящена изучению особенностей генерации и распространения ВРЧ в неоднородных средах и в присутствии границ (дно и поверхность) на примере мелководного акустического волновода. Численный алгоритм решения уравнения ХЗК для свободного пространства обобщается на распространение в неоднородных средах и/или с учетом наличия отражений от мягких границ на дне и поверхности. Приводятся результаты численного моделирования задачи для различных моделей подводного звукового канала и учета границ (четыре комбинации условий: однородное и неоднородное пространство, однородный и неоднородный волновод).

Проведено сравнение результатов квазилинейного и сильно нелинейного режимов работы параметрического излучателя на примере из §5.3 продемонстрировано сравнение результатов квазилинейного и сильно нелинейного режимов работы параметрического излучателя на примере изоскоростного волновода.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы А.В. Квашенниковой, список опубликованных работ автора по теме диссертации и общий список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на конференциях различного уровня. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Актуальность и прикладную значимость для гидроакустики, медицинских технологий с применением интенсивного ультразвука;
- Новизна. В работе получены ряд новых результатов, как демонстрация возможностей разработанной вычислительной модели, которые, впрочем, требуют отдельного изучения;
- Высокий уровень готовности результатов диссертационной работы для их последующего применения;
- Результаты работы показывают высокий уровень владения современными методами исследований, в первую очередь численными методами математического моделирования.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. Не приведены результаты исследования предложенной математической модели в части оценки порядка аппроксимации, устойчивости, условий сходимости, тем более что в работе предложен специальный метод прореживания спектров, эквивалентный введению дополнительного вычислительного поглощения;

2. В диссертационной работе для демонстрации возможностей разработанной модели проводится сравнение ее результатов с расчетами по различным асимптотическим формулам, ограничения которых и так известны. По мнению оппонента, целесообразно проводить сравнение полученных автором диссертации результатов с аналогичными, полученными также методами математического моделирования.

3. Имеется ряд замечаний по используемой автором терминологии, например, выражения «параметрическое взаимодействие двух волн» или «параметрические взаимодействия» неверно отражают физику рассматриваемых процессов, правильно использовать термин «трехволновое взаимодействие» или «нелинейное взаимодействие волн накачки с образованием волны разностной частоты».

При этом указанные замечания не снижают общей оценки выполненных А.В. Квашенниковой исследований и не влияют на общее впечатление от диссертации.

Считаю, что диссертация «Численное моделирование генерации волны разностной частоты в трехмерных ультразвуковых пучках в условиях сильного проявления нелинейности среды» соответствует специальности 1.3.7. «Акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, опре-

делённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Квашенникова Анастасия Валерьевна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник отдела перспективных разработок гидроакустических систем Акустического института имени академика Н.Н. Андреева

Савицкий Олег Анатольевич

«12» декабря 2024 года

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 126-84-11

E-mail: info@akin.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена кандидатская диссертация:

01.04.06 — «Акустика»

Адрес места работы:

117036, г. Москва, ул. Шверника, д. 4, стр. 1

Акционерное общество «Акустический институт имени академика
Н.Н. Андреева» (АО АКИН)

Телефон: +7 (499) 126-84-11; e-mail: info@akin.ru

«Подпись Савицкого Олега Анатольевича ЗАВЕРЯЮ»: