

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Петрова Павла Сергеевича
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 и апробации новых численных методов решения задач математического моделирования акустических полей, формирующихся при генерации волны разностной частоты. Наиболее замечательным в предложенных методах является их универсальность и гибкость, т.к. они дают возможность прямого численного анализа тонких физических процессов, возникающих при комбинировании дифракционных и нелинейных эффектов в ультразвуковых пучках. При этом в работе налагается минимум ограничений на симметрию излучателя и среды, а также на уровень интенсивности нелинейного взаимодействия акустических волн. Исключительно сложные по своей природе задачи, с которыми имеет дело соискатель, удается решить, благодаря применению оригинальных вычислительных приемов (например, «умной» эвристической отсечке гармоник в спектре) и современных методов (например, расщеплению операторных экспонент).

Результаты диссертации А.В. Квашенниковой лежат на одном из магистральных направлений современной теоретической и вычислительной акустики, связанном с математическим моделированием звуковых полей. Огромное число недавних научных работ российских и зарубежных ученых, нашедшее отражение в обзорных разделах работы, доказывает **актуальность** рассматриваемого исследования. Разработанные в диссертации методы и подходы существенным образом расширяют инструментарий для решения практических задач нелинейной акустики, особенно важный для приложений в медицине, что позволяет оппоненту с уверенностью говорить об их высокой **практической значимости**.

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

Первая глава работы посвящена краткому изложению истории и теоретических основ нелинейного параметрического взаимодействия акустических волн (и, в частности, параметрических излучателей). Вводная часть представляет собой исторический обзор круга приложений параметрических излучателей, где, в частности, демонстрируется превосходная научная эрудиция соискателя: упоминаются даже приложения таких излучателей в цифровом искусстве. Далее излагаются основы элементарной теории параметрических взаимодействий волн накачки Вестервельта (р. 1.1), а также дается описание более полной модели параметрической генерации на основе уравнений Вестервельта и ХЗК (р. 1.2). Главу продолжает изложение одномерной теории взаимодействия волн накачки, основанной на уравнении Бюргера и его приближенных решениях (р. 1.3), а также ее усложненного варианта, учитывающего дифракционные эффекты в многомерном случае (р. 1.4). В этом разделе возникают первые содержательные решения, которые используются для

валидации численных моделей в последующих главах. Раздел 1.6 посвящен рассмотрению известных численных методов для решения нелинейных уравнений распространения звука, моделирующих процессы параметрического взаимодействия. Данный раздел представляет собой очень подробный и содержательный обзор существующих методов и подходов. При этом соискатель выделяет и главные их недостатки, связанные с наличием приближений при учете дифракционных и/или нелинейных эффектов. Из этого вывода вполне естественным образом вытекает постановка задач, решаемых в настоящей диссертации.

Вторая глава работы подводит читателя к основным результатам диссертации, относящимся к многомерным задачам генерации низкочастотного излучения на разностной частоте. В этой главе решается их одномерный аналог, где волновое поле описывается одномерным уравнением Бюргерса. Глава достаточно обширна, и оппонент не считает нужным приводить ее обзор. В ней разработаны несколько численных схем для моделирования двухчастотного нелинейного взаимодействия высокочастотных волн накачки. В частности, предложен оптимизированный спектральный алгоритм, позволяющий существенно повысить эффективность расчетов путем отсечки нерелевантных спектральных компонент в решении. Кроме этого, в работе развит подход для решения уравнения ХЗК во временной области, основанный на схеме Годунова, улавливающей фронты ударных волн.

Третья глава диссертации посвящена развитию численного метода для решения уравнения ХЗК в трехмерной задаче генерации низкочастотного излучения на разностной частоте в квазилинейном приближении. Дополнительно соискатель использует предположение о том, что отношение частот волн накачки является рациональным числом. При этом для уравнения ХЗК (вернее, для уравнения, в котором с помощью последовательных приближений отделены волны накачки) строится численная аппроксимация пропагатора (раздел 3.1). Предложенный метод верифицируется путем сравнения результатов расчетов с результатами, полученными с помощью формулы Вестервельта, содержащей интеграл Рэля (раздел 3.2), а также с известными аналитическими решениями (раздел 3.3). Преимущество разработанного в данной главе численного метода по сравнению с известными из литературы полуаналитическими подходами состоит в возможности учесть нетривиальную геометрию излучающей системы (т.е. отказаться от предположения об осевой симметрии среды и решения).

Настоящим украшением работы является **четвертая глава**, в которой предложен и апробирован спектральный численный алгоритм для решения нелинейного уравнения ХЗК в задачах моделирования генерации волны разностной частоты при двухчастотном взаимодействии волн накачки. Ключевой формулой метода является представление пропагатора (4.2), соответствующее расщеплению соответствующей операторной экспоненты (раздел 4.1). В разделе 4.2 путем численного моделирования показано, что полностью нелинейная модель обеспечивает существенное повышение точности моделирования по сравнению с квазилинейным подходом из предыдущей главы. Эффективность расчетов обеспечивается методом прореживания спектра, который для более простых случаев был апробирован в предшествующих главах диссертации. Оппонент полагает, что данная глава и предложенный алгоритм являются основным и наиболее значимым результатом работы.

Пятая глава работы посвящена исследованию формирования и распростра-

нения волны разностной частоты в регулярном мелководном акустическом волноводе с учетом многократных отражений от дна и поверхности. Данное исследование выполнено путем численного решения уравнения ХЗК, что, по-видимому, представляет собой важный элемент научной новизны, поскольку в работах предшественников в основном рассматривались аналитические решения, полученные с использованием ряда упрощающих предположений. Хотя результаты главы, безусловно, имеют большую научную ценность, оппонент вынужден выразить некоторую досаду в связи с тем, что самая интересная для него часть работы получилась очень краткой, и, по сути, представляющей собой переложение статьи в сборнике трудов конференции (глава 5 выглядит несколько несбалансированной по размеру на фоне остальных глав диссертации). Особенно интересен раздел 5.3, где представлены результаты моделирования поля, формируемого параметрическим излучателем, работающим в ударноволновом режиме, в волноводе мелкого моря с мягкими границами.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, благодарности, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты опубликованы соискателем в наиболее авторитетных рецензируемых научных журналах, как отечественных («Акустический журнал»), так и зарубежных (J. Acoust. Soc. Am.). Оппоненту трудно представить себе кандидатскую диссертацию с публикациями более высокого уровня. Работа прошла апробацию на российских и международных научных мероприятиях. Наконец, оппоненту приятно отметить, что работа представляет собой структурно выверенный и отлично написанный научный труд, который было приятно прочесть.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Оппонент имеет следующие замечания по содержанию диссертационной работы:

1. Несколько ограничительным выглядит тот факт, что отношение частот волн накачки в гл. 3 является рациональным числом. Оппоненту представляется, что необходимо по крайней мере обсудить вопрос о том, что будет происходить с системой при расстройке данного резонанса.

2. Оппонент полагает, что термин ПЗК не очень подходит для описания волновода с глубинами в единицы и десятки метров, т.к. обычно это понятие связано с глубоководным распространением звука. Поскольку в данном случае волновод с квадратичным профилем скорости звука все равно ограничивается небольшим интервалом глубин в окрестности оси ПЗК, в работе можно было использовать, например, канонический профиль Манка и говорить о приосевом распространении в глубоком океане.

3. Вероятно, основным недостатком главы 5 рассматриваемой диссертации является тот факт, что дно в мелководном волноводе считается полностью отражающим, что весьма существенным образом снижает реалистичность поста-

новки задачи. Было бы очень интересно рассмотреть ту же задачу для волновода с проницаемым дном.

4. В разделе 1.5 было бы уместно показать пример трансформации профиля волны в ходе самодемодуляции (в противном случае непонятно, зачем показывать профиль исходной волны, т.к. любой читатель работы, вероятно, представляет, как выглядит модуляция гармоники гауссианой).

5. Утверждение (с. 24) «Несмотря на то, что точные решения уравнений (1.3) и (1.4) в общих случаях возможно получить только с использованием численных методов» является методически спорным, потому что численные методы по определению дают лишь приближенные решения уравнений.

6. Распространенная неточность – термин «схема Кранка-Николсона». Рецензент полагает, что правила английской фонетики и правила склонения имен собственных в русском языке предполагают прочтение «схема Крэнка-Николсон» (см. https://en.wikipedia.org/wiki/Phyllis_Nicolson).

7. В главе 3 следовало бы несколько подробнее проводить выкладки, например, пояснить, как формула (3.3) получается из (3.2). Из контекста можно это понять, но уточнение о том, как именно реализуется метод последовательных приближений, сделало бы изложение более ясным и четким.

8. Расшифровка аббревиатуры PML, предложенная в работе, является не вполне традиционной (см. https://en.wikipedia.org/wiki/Perfectly_matched_layer и оригинальную работу Беранже).

9. Оппонент понимает, что соискателю в интересах согласованности с другими главами работы было желательно сохранить в главе 5 те же обозначения для координатных осей, и потому не было возможности использовать координату z для глубины. Тем не менее, ось y все же следовало направить вниз, как это принято в акустике океана.

10. В разделе 1.4 следовало бы напомнить читателю определение функции $E_i(x)$. В разделе 3.1 следовало бы расшифровать сокращение к.с., по-видимому, означающее комплексно-сопряженные выражения.

Указанные замечания не являются критическими и не влияют на общую положительную оценку диссертации оппонентом.

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

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией геофизической гидродинамики
Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Петров Павел Сергеевич

«9» декабря 2024 года

Контактные данные:

тел.: +7 (423) 231-14-00

E-mail: petrov@poi.dvo.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.06 — «Акустика»

Адрес места работы:

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ТОИ ДВО РАН)

Телефон: +7 (423) 231-14-00; e-mail: pacific@poi.dvo.ru

Подпись Петрова Павла Сергеевича ЗАВЕРЯЮ:
учёный секретарь ТОИ ДВО РАН, к.г.н

Шлык Н.В.