

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., с.н.с. Козубской Татьяны Константиновны 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 Анастасии Валерьевны Квашенниковой посвящена важной и актуальной задаче исследования особенностей нелинейных взаимодействий высокочастотных волн накачки в различных режимах работы параметрического излучателя, включая режимы сильного проявления нелинейных эффектов с образованием ударных фронтов в профиле волны. Исследование направлено на разработку и апробацию численных алгоритмов для анализа физических процессов в трехмерных нестационарных полях, создаваемых плоским излучателем произвольной геометрии. Эта задача весьма актуальна для современных приложений в акустике, поскольку большинство известных аналитических и численных моделей построены для упрощенных конфигураций в приближении линейности, что естественным образом приводит к неточностям при описании существенно нелинейных и дифракционных эффектов для реалистичных излучателей, применяемых в различных областях подводной, воздушной и медицинской акустики.

Диссертация состоит из введения, главы с литературным обзором, четырех оригинальных глав, заключения и библиографии. Объем диссертации составляет 123 страницы и включает в себя 44 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 124 библиографические ссылки.

Во **введении** автор обосновывает актуальность исследования, формулирует цели и задачи работы, раскрывает научную новизну и практическую значимость исследуемой проблемы, описывает методологию исследования и выписывает положения, выносимые на защиту. Здесь же приводится информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава содержит литературный обзор, посвященный как теоретическому, так и численному описанию взаимодействий волн накачки на основе нелинейных дифференциальных уравнений Вестервельта и Хохлова-Заболотской-Кузнецова и их одномерного аналога – уравнения Бюргерса. Автор отмечает ключевые ограничения аналитических методов: во-первых, это упрощение геометрии задачи для возможности аналитического описания дифракционных эффектов, а во-вторых, использование приближения квазилинейности, что, однако, может не выполняться на практике. Также в этой главе представлен обзор численных алгоритмов, используемых для решения задач о

нелинейных взаимодействиях в поле параметрического излучателя, а также их сравнительный анализ применительно к исследуемой в диссертации проблеме. Особое внимание уделено сложностям моделирования в трехмерной постановке и необходимости построения новых алгоритмов для эффективного решения задач в случае сильного проявления нелинейности среды.

Вторая глава посвящена численному решению одномерной задачи для случаев бигармонической и импульсной накачки, поскольку именно построение нелинейных алгоритмов представляет особую сложность, особенно при возможной реализации разрывных режимов. В §2.2 представлен спектральный алгоритм для описания двухчастотного взаимодействия волн накачки, сопровождающегося генерацией волны разностной частоты. Развитый автором подход основывается на оптимизации расчетов системы нелинейных уравнений методом Рунге-Кутты 4 порядка точности путем прореживания спектра, состоящего в исключении низкоамплитудных компонент, что значительно сокращает вычислительные затраты и делает возможным моделирование трехмерных задач. Показано, что число оставляемых спектральных компонент может быть сокращено сотни раз с ошибкой при расчете амплитуды давления волны разностной частоты не более 2–3%. В §2.3 в качестве альтернативы спектральному развит временной подход на основе схемы Годуновского типа, приведенной в работе Тадмора, Курганова.

В третьей главе в приближении квазилинейности рассмотрена трехмерная дифракционная задача и представлен конечно-разностный алгоритм решения уравнения Хохлова-Заболоцкой-Кузнецова с использованием метода переменных направлений для описания дифракционных эффектов. Корректность метода для волн накачки проверяется путем сравнения с решением линейной дифракционной задачи методом интеграла Рэлея. Автором диссертации исследована генерация и распространение волны разностной частоты в квазилинейном режиме работы реалистичного параметрического излучателя в виде многоэлементной антенной решетки эллипсоидной формы. При сравнительном анализе с известными аналитическими моделями, построенными для упрощенной геометрии излучателя, показано, что такие модели справедливы лишь в ближнем поле излучателя, а при удалении от него для более точного описания волновой динамики требуется разработка полноценного трехмерного нелинейного метода.

Четвёртая глава также посвящена решению трехмерной задачи о генерации волны разностной частоты двухчастотным параметрическим излучателем, но уже в полной нелинейной постановке. Разработанный автором оптимизированный спектральный нелинейный алгоритм в сочетании с решением дифракционной квазилинейной задачи применяется для исследования ударноволновых режимов. Показано, что в случае сильного проявления нелиней-

ности среды генерация низкочастотного излучения происходит эффективнее с точки зрения его амплитуды давления и мощности, однако при этом ухудшаются свойства направленности пучка на разностной частоте. Поэтому наилучший режим работы излучателя может достигаться путем оптимального подбора желаемой выходной мощности и желаемой направленности применительно к конкретной задаче.

В **Пятой главе** автор диссертации завершает исследование нелинейных взаимодействий и обобщает результаты на среды с пространственными неоднородностями скорости звука и в присутствии границ на примере мелководного акустического волновода. Как и в случае распространения волн в свободном пространстве, при решении этой задачи также демонстрируется потребность в рассмотрении сильно нелинейных режимов работы излучателя с целью повышения эффективности генерации волны разностной частоты.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы Анастасии Валерьевны Квашенниковой, список ее публикаций по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в отечественных и зарубежных журналах (в том числе высокорейтинговых), а также докладами на конференциях различного уровня. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить очень хорошую проработанность автором темы диссертации, логическую структурированность диссертационной работы, глубокое понимание автором физики исследуемых акустических процессов, несомненное продвижение в разработке и применение новых численных алгоритмов для решения задач рассматриваемого класса, умение автора анализировать получаемые результаты и намечать пути дальнейшего их развития. Текст диссертации написан аккуратно, ясно и понятно, без видимых грамматических ошибок и опечаток.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. Все разрабатываемые в диссертационной работе методы и алгоритмы рассматриваются на примере задач гидроакустики для мелкого моря с характерными частотами порядка сотен кГц. Вместе с тем, подобные задачи могут возникать и в области воздушной акустики, и в медицинской акустике. Могут ли особенности области приложения и соответствующие ей величины частотных диапазонов внести какие-либо изменения в результаты работы?

2. В работе отсутствуют данные о верификации разработанных автором численных методов и алгоритмов на примере известных модельных задач и/или задач с известным аналитическим решением. Также в работе не приводится демонстрация сходимости численного решения с измельчением сетки и оценка скорости сходимости. Отсутствует информация о выборе шага по направлению z распространения волнового пучка. Достаточно ли требование по разрешению длины волны для обеспечения устойчивого счета? Данные замечания были бы особенно критичными для специальностей 1.1.6 (Вычислительная математика) или 1.2.2 (Математическое моделирование), однако для работы, посвященной численному моделированию, указанная выше информация была бы вполне уместной.

3. Вызывает некоторое сомнение достаточно эмпирический подход к прореживанию частот в разработанном автором спектральном алгоритме, а также оценка возможной ошибки в пределах 2–3%. Универсальна ли такая оценка? По каким критериям следует проводить прореживание частот или определять порог отсечений в общем случае с гарантией не превышения той или иной заданной допустимой ошибки?

4. Полное соответствие результатов по нелинейной модели с результатами квазилинейного приближения и аналитических моделей в ближнем поле излучателя является, скорее, необходимым, но отнюдь не достаточным условием корректной работы нелинейной модели в удалении от него. Безусловно, подтвердить корректность нелинейного описания и точность его реализующего метода могла бы подтвердить валидация относительно данных того или иного физического эксперимента. Рецензент понимает сложность постановки подобных численно воспроизводимых экспериментов и получения достоверных данных для сравнения, поэтому данное замечание является, скорее, пожеланием для продолжения работы в выбранном соискателем научном направлении.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненных А.В. Квашенниковой исследований и не влияют на общее впечатление от диссертации, которая представляет собой завершённое исследование высокого научного уровня.

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 Москов-

ском 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 — Квашеникова Анастасия Валерьевна — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник отдела 16 Института прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук

Козубская Татьяна Константиновна

«12» декабря 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 220-72-18

E-mail: kozubskaya@imamod.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы:

125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)

Телефон: +7 (499) 978-13-14; e-mail: office@keldysh.ru

Подпись Козубской Татьяны Константиновны ЗАВЕРЯЮ:

учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.

А.А. Давыдов