

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Беленькова Романа Николаевича «Исследование параметров нелинейности жидких сред на основе акустических данных», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика

Диссертационная работа Беленькова Р.Н. посвящена развитию теоретических методов предсказательного расчета нелинейных параметров жидких сред и созданию приборно-программного комплекса для проведения экспериментов по измерению необходимых для этого величин. Нелинейные параметры среды, определяющие так называемую физическую нелинейность, характеризуют непосредственно состав и структуру среды, связаны с ее уравнением состояния. Соответственно, актуальными проблемами являются как решение прямой задачи по расчету особенностей распространения акустических волн в средах с теми или иными нелинейными параметрами, так и обратной задачи по восстановлению свойств среды на основе измерений прошедших через среду акустических волн. Особенно важно это в ситуациях, когда рассматриваемая среда находится в экстремальных состояниях, например, под высоким давлением, и возможности применения неакустических методов ограничены. Цель диссертационной работы состоит именно в установлении зависимостей нелинейных параметров от внешнего воздействия в широком диапазоне изменения прикладываемого давления и изменения температуры. Тема диссертации является, несомненно, актуальной, что подтверждается большим объемом приведенной научной литературы, посвященной рассматриваемым вопросам, и активной деятельностью в области ультразвуковой диагностики материалов.

Диссертация Беленькова Р.Н. удачно совмещает в себе как теоретическое исследование по созданию новых физических моделей жидких сред, так и разработку экспериментального комплекса для проведения сложных измерений, а также численное моделирование распространения интенсивного звука в нелинейных средах. В диссертации предложены новые физические модели, позволяющие проводить расчет нелинейных параметров и нелинейного отклика жидких сред при приложении высоких внешних давлений. Показано их хорошее согласование с известными экспериментальными данными. Разработанный экспериментальный комплекс позволил провести измерения для ряда жидких сред, параметры которых ранее не были известны.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 167 страниц. В диссертации имеется 43 рисунка и 3 таблицы, список литературы состоит из 208 наименований.

Во введении освещается современное состояние разрабатываемых задач, обосновывается актуальность темы диссертации, дается краткий обзор научной литературы, формулируется цель и определяется круг решаемых задач, определяется научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационных исследований, приводятся защищаемые положения, а также кратко излагается содержание работы.

В Первой главе диссертации, имеющей преимущественно обзорный характер, приведены основные результаты по теоретическому подходу к расчету нелинейных параметров жидких сред и известные экспериментальные данные. Показано, что основные модели вводятся преимущественно феноменологически и не позволяют провести предсказательный расчет нелинейных параметров с достаточной точностью. Соответственно, актуальной задачей является развитие новых физических моделей.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу подходов к определению адиабатического параметра нелинейности как на основе данных нелинейно-акустического эксперимента, так и методов термодинамики и статистической физики. Последовательный анализ термодинамического состояния жидкой среды позволил определить источник неточности в широко используемой модели Номото, обусловленный неуниверсальностью зависимости скорости звуковых волн от плотности на изотермическом и изобарном пути деформации среды. На основе теории термодинамических флуктуаций давления выведен корректирующий член для данной модели. Показано также, что вклад в значение нелинейного параметра жидкой среды дают два механизма, обладающие различными зависимостями при изменении внешнего воздействия и соответствующего термодинамического состояния среды. Это позволило предложить более точный предсказательный подход, комбинирующий идеи флуктуационной модели для расчета одной из компонент и правила Рао для другой компоненты. Предсказательная способность полученного выражения подтверждена на примерах расчетов параметра нелинейности для нескольких жидкостей, для которых получено хорошее согласие с надежными экспериментальными данными в пределах соответствующих стандартных неопределенностей в широком интервале температур.

В Третьей главе проводится более общее построение предсказательной формы уравнения состояния жидкой среды на основе методов теории динамических систем с учетом нелинейных поправок. Показано, что хорошо известные эмпирические уравнения состояния

жидких сред Тейта и Мурнагана могут быть получены в рамках единого подхода в слабонелинейном приближении для дифференциальных уравнений термодинамики; вид уравнений не зависит от рода жидкости и определяется выбором термодинамических переменных. Построенная модель позволяет количественно предсказывать плотность жидкости при высоких и сверхвысоких давлениях, создаваемых как квазистатически, так и ударной волной, а также решать обратную задачу определения давления, создаваемого ударной волной, с использованием параметров, заданных при атмосферном давлении. Единственный параметр модели, величина которого не может быть задана при постоянном давлении, – изотермический параметр нелинейности – может быть рассчитан на основе модели фононной теории при нормальном давлении. Таким образом, в диссертации показана возможность построения предсказательной модели расчета скорости и нелинейного параметра при высоких давлениях, подтвержденная согласием с известными экспериментальными данными. Существенно, что основные величины, необходимые для расчета по предложенной модели, задаются при нормальном давлении и могут быть экспериментально измерены стандартными методами.

В Четвертой главе приведено описание разработанного оригинального радиотехнического компонента экспериментальной установки для высокоточного измерения скорости звука в жидкостях на основе импульсно-фазового метода фиксированного расстояния и дополняющего ее аппаратно-программного комплекса для обработки и анализа данных зондирующего и отраженных сигналов с учетом высокого уровня помех. Установка позволяет выполнять большое число последовательных измерений скорости звука без участия оператора, позволяя проводить автоматизированную обработку полученных данных, исключая артефакты, вызванные высоким уровнем зашумленности сигнала в вязких жидкостях при высоких давлениях. Комплекс использовался для измерения скорости звука ряда жидкостей, в том числе ранее неисследованных. Для эталонных жидкостей показано хорошее совпадение с литературными данными.

К основным результатам работы следует отнести: разработанные новые физические модели уравнений состояния жидких сред с учетом нелинейных поправок, позволяющих проводить предсказательные расчеты скорости звука и нелинейного параметра среды при высоких и сверхвысоких внешних давлениях на основе задания только параметров, измеряемых при нормальном давлении; применение флуктуационной теории для термодинамических плотности и давления, позволяющей связать высокочастотные микроскопические колебания среды и макроскопических акустических волны; проведение

высокоточных измерений ряда жидких сред, в том числе, ранее неисследованных на оригинальном экспериментальном комплексе.

Таким образом, работа отличается высокой степенью **научной новизны**. Основные материалы диссертации опубликованы в 9 научных работах, включая 4 статьи из перечня К1-К2 ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, и 5 работ в трудах конференции. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается их соответствием с известными теоретическими результатами, сравнением с результатами компьютерного моделирования и с результатами обработки экспериментальных данных. Полученные автором диссертации результаты имеют большую теоретическую и практическую значимость, и могут быть использованы при решении задач предсказания трансформации интенсивных акустических полей при прохождении через жидкие среды в экстремальных условиях, а также обратных задач ультразвуковой диагностики и определения свойств и структуры жидких сред.

Диссертация написана четким, понятным языком и хорошо оформлена. Вместе с тем по диссертации имеются следующие замечания.

1. В главе 2 показано, что решение Фубини для второй гармоники дает неточное значение нелинейного параметра по сравнению с уравнением Вестервельта. Этого можно было ожидать, т.к. решение Фубини изначально не учитывает влияние вязкости, а приведенное выражение (2.2) является только приближенным решением в приближении заданного поля, когда амплитуда первой гармоники не изменяется даже при учете нелинейной перекачки энергии. С другой стороны, использование модели Вестервельта для оценки нелинейного параметра представляется чрезмерным, т.к. это уравнение существенно в основном для дифракционных задач с широким пространственным спектром. В рамках одномерной задачи, рассмотренной в диссертации, эквивалентные результаты можно получить в рамках уравнения Бюргерса, для которого существуют точные общее решение и множество частных решений.
2. В диссертации в качестве основного нелинейного параметра рассматривается параметр Байера B/A , учитывающий вклад квадратичной нелинейности. При этом кубическая и более высокие порядки нелинейности отбрасываются. Ясно, что для акустических возмущений эта аппроксимация оправдана. Но при этом ясно и то, что такая

квадратичная аппроксимация будет различна для разных равновесных состояний среды, например, при изменении внешнего давления. Соответственно, проблемы известных моделей жидких сред при переходе к высоким давлениям могут быть связаны именно с попыткой навязать для разных равновесных состояний одну и ту же аппроксимацию, заданную при нормальном давлении. С другой стороны, при выводе ряда соотношений, например, (3.12), (3.34) использованы некоторые математические преобразования на физическом уровне строгости, что, скорее всего, неявно позволило учесть изменение параметров квадратичной аппроксимации при высоких давлениях и получить выражения, согласующиеся с экспериментальными данными.

3. Неоднократно упоминается, что для расчета применяется аналогия с методами теории динамических систем, однако конкретное пояснение в тексте отсутствует.
4. В главе 4 представлены результаты измерения скорости звука при изменении давления, однако результатов для нелинейного параметра не приведено.
5. Подписи на рисунках приведены на английском языке. Многие публикации в списке литературы, имеющие русскоязычные версии, также приведены только в англоязычном варианте.
6. На рис. 1.3(C) и 1.3.(D) представлены одинаковые графики.
7. Рис. 2.2 построен таким образом, что сложно различить построенные кривые.
8. Зависимость (2.14) названа экспоненциальной, хотя это степенная зависимость.

Отмеченные недостатки не влияют на общую, несомненно, положительную, оценку диссертации.

Диссертационная работа Беленькова Романа Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научные результаты и положения, в должной мере отраженные в научных публикациях из перечня ВАК и прошедшие апробацию на научных конференциях. Научные положения и выводы обоснованы в достаточной степени, достоверность защищаемых положений и результатов не вызывает сомнений. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

По своей актуальности, достоверности и обоснованности результатов, теоретической и практической значимости диссертационная работа соответствует критериям, установленным требованиями пп. 9 – 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в актуальной редакции, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Беленьков Роман Николаевич заслуживает присуждения

ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.7 – Акустика.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник кафедры акустики физического факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.7 (01.04.06) – Акустика, Гусев Владимир Андреевич

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

e-mail: vgusev@bk.ru

телефон: +7 (926) 717-59-94

06 марта 2026 г.

Ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук

В.А. Гусев

Подпись В.А. Гусева заверяю.

И.о. декана физического факультета,

Профессор В.В. Белокуров

