

## Отзыв официального оппонента на диссертацию

Беленькова Романа Николаевича «Исследование параметров нелинейности жидких сред на основе акустических данных», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

### **Актуальность и новизна работы**

Диссертационная работа посвящена разработке методов определения и расчета параметров нелинейности жидких сред. Актуальность темы обоснована необходимостью диагностики свойств веществ, в том числе новых материалов, при высоких давлениях. Ультразвуковое зондирование рассматривается как один из эффективных подходов, однако, как отмечено во введении, методы нелинейной акустики для этих целей разработаны в меньшей степени. Существующие теоретические модели имеют ограниченную применимость, а экспериментальные данные, особенно для новых классов жидкостей, фрагментарны.

### **Научная новизна, теоретическая и практическая значимость**

В работе заявлен ряд новых результатов:

1. Предложен метод определения параметра нелинейности ( $B/A$ ) на основе данных линейной акустики и термодинамики, что позволяет отказаться от использования волн конечной амплитуды для его прямой оценки.
2. Разработан метод восстановления кривых «давление-плотность» для жидкостей при высоких (до гигапаскалей) давлениях. Метод базируется на решении краевой задачи с использованием скорости звука и позволяет прогнозировать плотность как при статическом, так и при ударно-волновом сжатии.
3. Создан автоматизированный программно-аппаратный комплекс для измерения скорости звука в жидкостях при высоких давлениях. С его помощью впервые получены данные по скорости звука для трех ионных жидкостей с трифлат-анионом ( $[BMIM][OTf]$ ,  $[EtPy][OTf]$ ,  $[Dema][OTf]$ ) в диапазоне давлений до 196.2 МПа.
4. В ходе экспериментов с использованием данного комплекса впервые акустическим методом зафиксирован эффект замерзания ионных жидкостей  $[BMIM][OTf]$  и  $[EtPy][OTf]$  под высоким давлением.

Данные результаты обладают как теоретической значимостью в области разработки новых акустико-термодинамических подходов к предсказательному расчету свойств жидких сред при экстремальных состояниях, так и практической значимостью в силу демонстрации работоспособности разработанных подходов в приложении к технически-важным классам жидкостей.

**Достоверность и обоснованность** представленных новых результатов обеспечиваются корректностью применения фундаментальных уравнений акустики и термодинамики, дополненной верификацией выдвинутых физических гипотез на основе надежных экспериментальных данных, грамотно проведенной статической обработкой полученных новых экспериментальных данных и калибровкой использованного оборудования.

### **Публикации по теме диссертации и ее апробация**

Представленные результаты, отражающие личный вклад автора, опубликованы в научных статьях, количество которых удовлетворяет требованиям ВАК в отношении кандидатских диссертаций, а также прошли апробацию в виде докладов на ряде научных конференций, тематика которых полностью соответствует специальности, по которой диссертация представлена к защите.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность работы, приводящая к постановке цели исследования и задач в ее рамках, описаны теоретическая и практическая значимости полученных результатов, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, сведения о публикациях и апробации работы, а также личном вкладе в них автора.

**В первой главе** представлен обзор литературы по термодинамике жидкостей и методам акустического зондирования. Рассмотрены основные уравнения состояния (Тейта, Мурнагана, FT-EoS), связь термодинамических параметров с флуктуациями,

а также классификация экспериментальных методов измерения скорости звука (импульсные, фазовые, резонаторные).

**Вторая глава** посвящена исследованию адиабатического параметра нелинейности  $V/A$ . Автор демонстрирует на примере толуола, что расхождения в литературных данных могут быть связаны с методикой обработки. Показано, что прямое использование аналитического решения Фубини для расчета  $V/A$  по второй гармонике приводит к завышенным значениям, и более точный результат дает численное решение уравнения Вестервелта, учитывающее затухание. Также в главе предлагается уточненная предсказательная модель для  $V/A$ , комбинирующая флуктуационную теорию для изотермической части и правило Рао для изобарной части. Модель верифицирована на примере толуола, гептана и додекана.

**В третьей главе** рассматривается изотермический параметр нелинейности. Автор показывает, что уравнения Тейта и Мурнагана могут быть получены из теории линейного отклика. Для предсказания плотности при сверхвысоких давлениях предлагается использовать полусумму этих уравнений, а единственный неизвестный параметр ( $k'$ ) интерпретируется в рамках фононной теории жидкостей через параметр Грюнайзена. Предложенный метод верифицирован на обширных экспериментальных данных Бриджмена для широкого круга органических жидкостей, а также для метанола и этанола при давлениях до нескольких ГПа. Показана возможность решения как прямой (определение плотности), так и обратной (определение давления по известной плотности) задачи для ударно-волнового сжатия.

**Четвертая глава** носит экспериментальный характер. Описан разработанный автором программно-аппаратный комплекс на основе ПЛИС, реализующий автоматизированное измерение времени задержки ультразвуковых импульсов с цифровой обработкой сигнала. Приведены результаты измерения скорости звука в трех ионных жидкостях в широком диапазоне давлений и температур. Показано хорошее согласие с доступными литературными данными при атмосферном давлении. Для  $[Dema][OTf]$  данные получены впервые. Акустическим методом зафиксировано плавление жидкостей  $[BMIM][OTf]$  и  $[EtPy][OTf]$  под давлением. На основе полученных данных рассчитана плотность жидкостей, и проведен анализ,

показывающий, что ионные жидкости требуют иного значения параметра нелинейности для уравнения Тейта, чем молекулярные.

**В заключении** приведены общие выводы по работе.

## **Замечания**

По тексту работы можно сделать следующие замечания:

1. В первой главе приводится обширный обзор литературы, однако некоторые разделы, в частности по радиоэлектронным схемам, носят описательный характер без глубокого критического анализа. Обзор мог бы выиграть от более четкого обоснования выбора именно импульсно-фазового метода для решения поставленных задач.
2. В главе 2 при сравнении предложенной флуктуационной модели с данными Номото и экспериментом, анализ ограничен атмосферным давлением. Было бы полезно обсудить, как предлагаемая модель поведет себя при высоких давлениях, хотя бы на качественном уровне.
3. В главе 3 при проверке метода на данных ударно-волнового сжатия для н-гексана (рис. 3.7) наблюдается систематическое отклонение расчетной кривой от экспериментальных точек при давлениях выше  $\sim 2$  ГПа. Автор объясняет это «небольшим несоответствием», однако природа этого расхождения (возможно, влияние разогрева на ударной волне, которое не учитывается изотермической моделью) требует более детального комментария. Вывод о том, что при сверхвысоких давлениях разница между изотермической и адиабатической сжимаемостями становится пренебрежимо малой, требует более строгого обоснования для конкретных условий ударного эксперимента.
4. В тексте встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности, не влияющие на понимание материала.

## **Заключение**

Диссертационная работа Беленькова Р.Н. представляет собой завершенное научное исследование, направленное на решение актуальной задачи — разработки методов предсказательного расчета и экспериментального определения параметров нелинейности

жидких сред при высоких давлениях. Автором предложены новые расчетные подходы, верифицированные на обширном экспериментальном материале, и разработан автоматизированный измерительный комплекс. Полученные экспериментальные данные для ионных жидкостей являются новыми и имеют практическую ценность. Несмотря на отмеченные замечания, работа выполнена на хорошем научном уровне, а выносимые на защиту положения обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Высказанные замечания носят рекомендательный характер и несколько не снижают ценности работы «Исследование параметров нелинейности жидких сред на основе акустических данных», которая удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Беленьков Роман Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

доктор физико-математических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник  
лаборатории вычислительной физики  
Будков Юрий Алексеевич

04.03.2026

Контактные данные:

Тел.: +7 (4932) 35-18-69; e-mail: ybudkov@hse.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы: 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»: <https://www.hse.ru/>

Подпись сотрудника НИУ ВШЭ

Ю.А. Будкова удостоверяю:



Подпись заверяю

