

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»,
кандидат физико-математических наук



В.А. Ирха

19.02.2026

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»**

о диссертационной работе Беленькова Романа Николаевича на тему
«Исследование параметров нелинейности жидких сред на основе
акустических данных», представленной к защите на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. –
Акустика

Актуальность диссертационной работы Р. Н. Беленькова связана с широким кругом научных и прикладных проблем, эффективный подход к решению которых возможен с применением методов физической акустики. При этом в настоящее время фокус внимания сдвигается от достаточно надежно разработанных методов ультразвуковой акустики на основе линейных волн к нелинейным задачам. Исследование свойств нелинейного отклика жидких сред необходимо как с точки зрения фундаментальных вопросов теории уравнений состояния, имеющих предсказательную силу вдали от кривой равновесия «жидкость-пар», то есть в области, где классические подходы кубических уравнения состояния слабо применимы, так и практической разработки физических моделей поведения топлив (в частности, используемых в дизельных аккумуляторных двигателях (common rail)), мониторинге процессов в химических реакторах высокого давления, для которых акустическое зондирование является практически единственным способом характеристики состояния в закрытом резервуаре, разработке методов создания экстремальных состояний вещества путем их ударно-волновой компрессии и, соответственно, мониторинга термодинамических свойств веществ, сжатых таким образом. Помимо этого, следует отметить также необходимость пополнения баз данных о термодинамических свойствах новых перспективных веществ, таких как ионные жидкости, для которых измерения при высоких давлениях, в особенности, скорости звука, представленные в научной литературе, буквально единичны.

В рамках очерченного выше круга задач, к которым обращается данное диссертационное исследование, получен ряд результатов, обладающих несомненной **научной новизной**, заключающейся в следующем:

- новом методе расчета параметра нелинейности звуковых волн конечной амплитуды на базе данных, получаемых на основе акустики линейных волн и фундаментальных термодинамических соотношений, позволяющих учесть нелинейную взаимосвязь акустических, термодинамических и теплофизических параметров;
- новом методе восстановления кривых «давление-плотность» при сильном нелинейном сжатии жидкой среды, базирующемся на оригинальном применении математического аппарата теории динамических систем к задачам акустики и термодинамики, с использованием акустических и термодинамических данных при нормальном давлении в качестве граничных условий; применение разработанного метода впервые позволило получить возможность предсказания плотности органических жидкостей вплоть до давлений гигапаскалевого интервала как при статическом, так и при ударно-волновом сжатии без привлечения дополнительных данных измерений при повышенных давлениях;
- создании нового электронного аппаратно-программный комплекс для ультразвукового зондирования жидкостей при нормальном и высоких давлениях, позволяющий осуществлять детектирование нестационарных явлений, вызванных высокими давлениями, на основе акустических измерений, в частности, впервые зарегистрированного эффекта отвердевания ионных жидкостей, индуцированного высокими давлениями;
- получении совокупности новых акустических и термодинамических данных для трех ионных жидкостей, содержащих анион трифлата.

Совокупность перечисленных новых результатов составляет **теоретическую значимость** работы, которая определяется разработанной концепцией предсказательного расчета состояния жидких сред при нелинейном статическом и ударно-волновом сжатии, а также акустического параметра нелинейности нелинейных волн во взаимосвязи макроскопического (термодинамического) и микроскопического (молекулярного) уровней рассмотрения. Предсказательные возможности данного подхода, верифицированного множественным сравнением с экспериментальными данными, обуславливают **практическую значимость** работы, как дающей достаточно простую в реализации методологию расчета и анализа акустических (и термодинамических на их основе) параметров жидких сред при сверхвысоких сжатиях; кроме того, практическую ценность имеет созданная автором экспериментальная установка для акустического зондирования жидкостей при высоких давлениях и полученные с ее использованием новые справочные данные по ионным жидкостям.

Достоверность и обоснованность указанных выше результатов обеспечивается использованием физически-обоснованных и математически-корректных подходов акустики, термодинамики и теории динамических систем, а также продемонстрированным согласием результатов моделирования с данными прямых физических измерений, подтвержденным грамотным применением статистической обработки и анализа данных.

В силу отмеченной теоретической и практической значимости исследования, можно ожидать, что его результаты будут востребованы широким кругом научно-исследовательских организаций и подразделений университетов, ведущих работу в области физики сплошных сред, таких как Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова РАН, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского и других.

По **структуре и содержанию** диссертационная работа Р. Н. Беленькова представляет собой научно-квалификационную работу, текст которой обладает внутренним единством в отношении заданной цели исследования. Он изложен логично и последовательно, включая введение, четыре главы, заключение и список литературы, отражающий знакомство автора с современным состоянием исследований в области науки, которой посвящена диссертация.

Во **Введении** обосновывается актуальность проблемы, которой посвящена диссертация, на основе чего сформулирована цель работы и поставленные соответствующие ей задачи, указана научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимости и положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о методологии и методах исследования, достоверности соответствии паспорту специальности, апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава представляет собой обзор представленного в научной литературе современного состояния науки в рассматриваемой области, который включает в себя термодинамические особенности жидких сред при высоких давлениях и их взаимосвязь с акустическими свойствами, основные положения нелинейной акустики в контексте задач зондирования сплошных сред, основные экспериментальные подходы к определению характеристик нелинейных волн со специальным фокусом на современные подходы к реализации радиоэлектронных схем установок для термодинамических исследований жидкостей на основе акустического зондирования.

Вторая глава посвящена ключевому параметру, характеризующему распространение акустических волн высокой интенсивности – параметру нелинейности Байера. На основе анализа большого массива литературных данных о величине этого параметра автором выделены существующие противоречия как в его значении, определенном различными методами, так и между ними и модельными расчетами. Для разрешения этого противоречия проведены исследования, описанные в данной главе, по двум направлениям. Первое: на основе компьютерного моделирования уравнения Вестервельта распространения нелинейной звуковой волны в условиях, соответствующих детектированию ее двух гармоник, установлена необходимость (и предложен соответствующий метод) учета диссипативных эффектов, что приводит к самосогласованной картине данных. Второе: на основе флуктуационной теории термодинамики жидкости и акустического правила Рао предложена новая расчетная модель, предсказывающая величину параметра нелинейности Байера без привлечения измерений при высоких давлениях и на второй гармонике волны. Разработанная расчетная модель верифицирована на достаточно репрезентативном наборе данных для органических жидкостей.

Содержание **третьей главы** расширяет данный подход на случай изотермического параметра нелинейности, определяемого по зависимости изотермической сжимаемости жидкости от давления, которая является существенной при статическом сжатии жидкостей на интервале давления порядка гигапаскаля или при распространении акустических ударных волн, позволяющих достичь больших сжатий при давлениях до десятков гигапаскалей. Ключевым новым подходом, описанным в данной главе, является обращение с нелинейными термодинамическими равенствами на основе подхода, позаимствованного из теории анализа динамических систем, что позволило получить решения, обобщающие эмпирические уравнения Тейта и Мурнагана, и предложить метод прогнозирования плотности сверхсильно сжатых жидкостей по данным, полученным при атмосферном давлении, среди которых параметр, определяемый по зависимости скорости звука от плотности для различных температур, играет решающую роль. Метод продемонстрировал высокую точность не только для статически сжатых органических жидкостей, но и для жидких сред, сжатых ударной волной, что является одним из наиболее нетривиальных выводов работы.

Работы, составляющие содержание **четвертой главы**, мотивированы необходимостью обобщения подхода на более широкий круг веществ – ионные жидкости. Такие жидкости начали исследоваться сравнительно недавно, и количество имеющихся по ним данных для высоких давлений весьма ограничено. Автором диссертации создана новая радиотехническая схема экспериментальной установки для измерения скорости звука в жидкостях на основе импульсно-фазового метода фиксированного расстояния, сопряженная с аппаратом, позволяющим достигать давления до 196.1 МПа в достаточно больших (порядка

нескольких десятков миллилитров) объемах жидкости. С ее помощью, во-первых, получен большой массив новых данных о скорости звука в трех видах ионных жидкостей в широком интервале давлений и температур. Их воспроизводимость на основе обсуждаемого модельного подхода также проанализирована. Во-вторых, открыт эффект отвердевания ионной жидкости приложенным давлением. Последнее является прямым следствием особенностей созданной установки регистрации динамики акустического сигнала в режиме реального времени, что позволило идентифицировать фазовый переход.

В **заключении** приводятся основные выводы работы.

Количество **публикаций** по результатам, представленным в диссертационной работе, соответствует требованиям ВАК, среди них стоит выделить статьи в таких значимых международных научных журналах, как Applied Acoustics и Scientific Reports, **апробация** работы прошла в виде докладов на ряде научных конференций, соответствующих отрасли науки, по которой диссертация представлена к защите, в частности, на сессиях Российского акустического общества.

Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

Вместе с тем, к материалу, изложенному в тексте диссертации, имеется ряд вопросов и замечаний:

1. На стр. 104–105 обсуждается динамическое сжатие ударной волной и разница между изотермической и адиабатической сжимаемостью. Это обсуждение носит чисто эмпирический характер. Не хватает теоретических оценок характерных временных масштабов, на которых можно полагаться на первый или второй вариант, и сопоставления их с параметрами ударной волны (длительностью импульса). Не освещен явно вопрос о возможном влиянии релаксации скрытых степеней свободы (теория Мандельштама – Леонтовича (1937)).
2. На стр. 87 приводятся аргументация в пользу использования линейной комбинации (3.36) уравнений состояния Тейта и Мурнагана, однако не приведены иллюстрации или количественные оценки, подтверждающие предпочтительность формулы (3.36).
3. Формат библиографической ссылки [175] в диссертации не соответствует ГОСТу, а по приведенным данным не получается найти публикацию в elibrary.ru; популярные поисковые системы сети Интернет так же не дают результата. Видимо, это соответствует публикации [9] автореферата. Ссылка [125] в диссертации написана на английском, тогда как в автореферате ссылка [4] дается на русском (обе ссылки – на русскую версию, а не переводную). При чтении это вызывает путаницу.

Замечания носят непринципиальный характер, не влияют на достоверность результатов и не снижают значимость работы.

Таким образом, можно заключить, что представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение совокупности научных задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение в области физической акустики, соответствует паспорту специальности 1.3.7. Акустика и требованиям пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Беленьков Роман Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании ученого совета Физико-математического института ПГНИУ. Протокол №7 от 18 февраля 2026.

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук
(1.3.3. Теоретическая физика), доцент,
профессор Центра прикладной математики и физики
Физико-математического института ПГНИУ

(Д.А. Петров)

Доктор физико-математических наук
(05.13.18. Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ), доцент,
директор Физико-математического института ПГНИУ

(М.А. Барулина)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Почтовый адрес: 614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Телефон: +7 (342) 239-64-35

E-mail: info@psu.ru

Официальный сайт организации: <https://www.psu.ru>



Беленьков
Барулина
секретарь
Б.А. Иванов