

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 01.04.2026 г. № 7.

О присуждении Беленькову Роману Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование параметров нелинейности жидких сред на основе акустических данных» по специальности 1.3.7 – Акустика принята к защите 17 декабря 2025 г., протокол № 35, диссертационным советом 24.2.340.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособнадзора № 105/нк от 11 апреля 2012 г.

Соискатель, Беленьков Роман Николаевич, 14 сентября 1996 года рождения, в 2020 году окончил магистратуру факультета физики, математики, информатики Курского государственного университета по специальности «прикладная математика и информатика». С 2020 по 2024 год обучался в аспирантуре факультета физики, математики, информатики (специальность 03.06.01 – Физика и астрономия).

В период подготовки диссертации Беленьков Роман Николаевич работал в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Курский государственный университет» в должности ассистента на кафедре физики и нанотехнологий факультета физики, математики, информатики, где работает по настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре физики и нанотехнологий факультета физики, математики, информатики ФГБОУ ВО «Курский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель доктор физико-математических наук Постников Евгений Борисович, профессор кафедры физики и нанотехнологий факультета физики, математики, информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. Будков Юрий Алексеевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), профессор Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
2. Гусев Владимир Андреевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук (специальность 1.3.7 – Акустика), старший научный сотрудник кафедры акустики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, в своем **положительном** отзыве, утвержденном 19.02.2026 г. кандидатом физико-математических наук Ирха В.А., проректором по научной работе и инновациям ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», подписанном доктором физико-математических наук Петровым Д.А., профессором Центра прикладной математики и физики Физико-математического института ПГНИУ и доктором физико-математических наук Барулиной М.А., директором Физико-математического института ПГНИУ, указала, что диссертация Беленькова Романа Николаевича удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Беленьков Роман Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых WoS и Scopus, опубликовано 4 работы. Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях.

Авторский вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы заключается в проведении аналитических исследований, численного моделирования, обработке экспериментальных данных, анализе полученных результатов, формулировании выводов и подготовке текстов публикаций.

Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Verveiko, V. Direct and inverse problem of interrelation between the high pressure and the density: The case study of liquid bromobenzene's acoustic sounding / V.N. Verveiko, **R.N. Belenkov**, E.B. Postnikov // Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 223. – P. 110078.
2. Acoustic and volumetric properties of triflate-based ionic liquids at high pressures / **R.N. Belenkov** [et al.] // Fluid Phase Equilibria. – 2024. – Vol. 586. – P. 114179.
3. Postnikov, E.B. Combining the Tait equation with the phonon theory allows predicting the density of liquids up to the Gigapascal range / E.B. Postnikov, **R.N. Belenkov**, M. Chorążewski // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 3766.
4. **Беленьков, Р.Н.** Подход к расчету параметра нелинейности ультразвуковых волн в жидкости, основанный на масштабной теории термодинамических флуктуаций давления / **Р.Н. Беленьков**, Е.Б. Постников // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2023. – Т. 32. – С. 45–62.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов от:

1. Караваева Анатолия Сергеевича, доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, заведующего кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов.
2. Пономаренко Владимира Ивановича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, ведущего научного сотрудника Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов.
3. Лебедевой Елены Александровны, доктора физико-математических наук по специальности 1.1.1 – Вещественный, комплексный и функциональный анализ, профессора кафедры математического анализа ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.
4. Ягофарова Михаила Искандеровича, доктора химических наук по специальности 1.4.4 – Физическая химия, доцента кафедры физической химии Химического института им. А.М. Бутлерова ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань.
5. Ряполова Петра Алексеевича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, декана факультета цифровых технологий ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск.

Все отзывы **положительные**. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания.

Замечания из отзыва ведущей организации.

На стр. 104–105 обсуждается динамическое сжатие ударной волной и разница между изотермической и адиабатической сжимаемостью. Это обсуждение носит чисто эмпирический характер. Не достаёт 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)).

На стр. 87 приводится 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).

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 на переводную). При чтении это вызывает путаницу.

Замечания из отзыва официального оппонента Будкова Ю.А.

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.

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.

В главе 3 при проверке метода на данных ударно-волнового сжатия для *n*-гексана (рис. 3.7) наблюдается систематическое отклонение расчетной кривой от экспериментальных точек при давлении выше 2 ГПа. Автор объясняет это «небольшим несоответствием», однако природа этого расхождения (возможно 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.

В тексте встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности, не влияющие на понимание материала.

Замечания из отзыва официального оппонента Гусева Ю.А.

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 Бюргера, для которого существуют точные общие решения и множество частных решений.

В диссертации в качестве основного нелинейного параметра рассматривается параметр нелинейности 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 изменения квадратичных параметров аппроксимации при высоких давлениях и получить выражения, согласующиеся с экспериментальными данными.

Неоднократно упоминается, что для расчета применяется аналогия с методами теории динамических систем, однако конкретное пояснение в тексте отсутствует.

В главе 4 представлены результаты измерения скорости звука при изменении давления, однако результатов для нелинейного параметра не приведено.

Подписи на рисунках приведены на английском языке. Многие публикации в списке литературы, имеющие русскоязычные версии, также приведены только на английском языке.

На рис. 1.3 (C) и 1.3 (D) представлены одинаковые графики.

Рис. 2.2 построен таким образом, что сложно различить построенные кривые.

Зависимость (2.14) названа экспоненциальной, хотя это степенная зависимость.

Замечание из отзыва на автореферат Лебедевой Е.А.

Согласно уравнению (5) в автореферате, в третьей главе фактически проводится экстраполяция на положительную полупрямую логарифмического решения, полученного только для малых значений аргумента, а возникающее отклонение от физических данных компенсируется

использованием взвешенного среднего с решением, построенным аналогичным образом для разложения относительного изменения первой производной; не будет ли лучше ограничиться вторым-третьим членами разложения логарифма в ряд Тейлора, что соответствует порядку нелинейности рассматриваемых задач?

Замечание из отзыва на автореферат Пономаренко В.И.

При описании аппаратно-программного комплекса стоило бы кратко отметить его основные технические характеристики, чтобы более полно оценить его технические возможности.

Замечание из отзыва на автореферат Ягофарова М.И.

В работе предлагается комбинированное уравнение состояния, представляющее собой полусумму уравнений Тейта и Мурнагана (ур. 7). Такое усреднение даёт высокую точность предсказания ($R^2=0.996$), однако физическое обоснование именно этой формы комбинации остаётся не вполне ясным. Не является ли достигнутая точность следствием взаимной компенсации систематических ошибок каждого из уравнений в отдельности? Планируется ли разработка более строгого теоретического обоснования для выбора весовых коэффициентов при комбинировании?

Для некоторых объектов исследования наблюдаются систематические положительные или отрицательные отклонения предсказанных плотностей жидкости от экспериментальных (Рис. 3В). Можно ли связать природу этих отклонений с молекулярной структурой или другими особенностями строения этих соединений, например, с образованием межмолекулярных водородных связей в жидкой фазе? Если подобный анализ проводился, были ли попытки ввести дополнительные поправки для учёта этих факторов?

В подписях на графиках наблюдается некоторая непоследовательность. Например, на Рис. 1 единицы измерения (сантиметры) указаны в двух вариантах: на русском и на английском языках (см и cm). Также не переведены на русский подписи в легенде Рис. 1 и названиях осей на Рис. 3.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее:

Предложена теоретическая модель на базе термодинамических флуктуаций давления, позволяющая определять адиабатический параметр нелинейности Байера исключительно через характеристики среды при атмосферном давлении. Результаты расчетов подтверждаются результатами экспериментов по акустическому сжатию. Проанализированы расхождения в значениях адиабатического параметра нелинейности, возникающие при сопоставлении нелинейно-акустических и термодинамических методов.

Предложена теоретическая модель для прогнозирования состояния жидких сред в условиях высоких давлений, основывающаяся на фононной теории жидкостей. Данная модель построена по принципу динамических систем, где роль временного фактора выполняет переменное давление. Эффективность подхода доказана как для квазистатических процессов, так и для динамического сжатия ударными волнами в диапазоне до десятков ГПа.

Разработан автоматизированный аппаратно-программный комплекс для изучения физико-химических свойств ионных жидкостей, работающий в диапазоне давлений до 200 МПа. С помощью полученных акустических данных произведен расчет плотности исследуемых жидкостей методами численного интегрирования. Кроме того, впервые экспериментально зафиксирован индуцированный давлением эффект отвердевания (фазового перехода) для двух типов ионных жидкостей.

Теоретическая значимость исследования обусловлена тем, что сформулирован и обоснован подход, объединяющий в единую предсказательную систему методы акустического зондирования, математический аппарат теории динамических систем и принципы теории термодинамических флуктуаций, обеспечивающий фундаментальное описание адиабатического параметра нелинейности, определяющего динамику распространения интенсивных акустических сигналов. Выявлены и количественно описаны особенности связи между микроскопическими процессами — высокочастотными молекулярными осцилляциями в жидкостях — и интегральными макроскопическими свойствами среды. Установление этой связи позволило интерпретировать механизмы акустического переноса и нелинейной деформации через характеристики внутренней молекулярной динамики, что открывает новые возможности для моделирования поведения сложных жидких систем на основе их структурных характеристик. Полученные результаты диссертации вносят значимый вклад в развитие предсказательных моделей для линейной и нелинейной акустики.

Значение полученных соискателем результатов для практики определяется возможностью использования предложенных методов для предсказательного расчета свойств жидких сред при нелинейном статическом и ударно-волновом сжатии до сверхвысоких давлений.

Оценка достоверности полученных результатов исследования выявила, что изложенные в диссертационной работе результаты подтверждаются их непротиворечивостью с точки зрения физических законов и математических методов, согласием с апробированными экспериментальными данными, а также использованием калибровки разработанного оборудования на основе стандартных справочных данных.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач, проведении аналитических исследований и численного моделирования, обработке и анализе

полученных экспериментальных результатов, подготовке публикаций в научные журналы.

В ходе защиты диссертации членами диссертационного совета критических замечаний высказано не было, но были заданы следующие вопросы:

1. Экспериментальная установка предназначена для того, чтобы измерять амплитуду первой и второй гармоники проходящего сигнала и время задержки. Могли бы вы сказать какие вам необходимы точности определения амплитуды и задержки, и какие они реально получались исходя из выбранных вами параметров установки: полосы фильтра, частоты дискретизации, длины выборки и так далее?
2. В тексте автореферата говорилось про использование решения Фубини. На рисунке со спектрами акустических сигналов видно, что амплитуда второй гармоники является достаточно малой величиной. Можно ли было использовать метод возмущений для расчета? Не лучше ли было в рамках одномерной задачи использовать вместо уравнения Вестервельта уравнение Хохлова-Заболоцкой?
3. В каком виде излучался сигнал, это были импульсные пакеты синусоиды или непрерывный сигнал? Достаточно ли было размеров акустической ячейки для прохождения акустических сигналов?
4. При математическом моделировании возникает составная ошибка моделирования, в которую входит, в частности, неустранимая ошибка, которая является ошибкой задания параметров модели. Как соотносятся у вас эти ошибки? Есть ли какие-нибудь высказывания в вашей работе по поводу соотношения этих ошибок?
5. В эксперименте с ионными жидкостями использовался достаточно большой набор различных жидкостей. Как оценивался класс чистоты, степень чистоты, повлияют ли примеси в этих жидкостях на результаты эксперимента?
6. Как оценивалась степень нелинейности вашей системы? Заявлено, что она имеет квадратичную нелинейность, однако существуют среды, в которых кубическая нелинейность превышает квадратичную. Было ли обосновано экспериментально наличие только квадратичной нелинейности?
7. Проводились ли измерения нелинейных параметров для ионных жидкостей? Для этого использовалась установка по измерению скорости звука или было что-то дополнительно разработано?

Соискатель Беленьков Р.Н. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и замечания и привел собственную аргументацию:

1. С помощью данной установки параметры нелинейности по амплитудам первой и второй гармоники не измеряли, поскольку у нас не получилось экспериментально детектировать сигнал на второй гармонике. Для этого требовался сигнал достаточно высокой амплитуды, который

используемый нами цифровой генератор формировать не мог. При фильтрации мы убрали из спектра высокочастотные шумовые компоненты, которые могли влиять на форму отраженного акустического сигнала. После фильтрации качество сигнала значительно улучшалось и при использовании классического порогового метода удавалось добиться точности измерения скорости звука порядка 3 м/с.

2. Да, метод возмущений возможно было использовать, но в работе мы решили сконцентрироваться именно на численном моделировании при помощи уравнения Вестервельта. Да, можно было использовать уравнения меньшего уровня сложности чем уравнение Вестервельта и получить похожие результаты, но в случае, если в рамках эксперимента будет решаться задача с широким пространственным спектром, то упрощенных моделей может оказаться недостаточно и придется возвращаться к использованию уравнения Вестервельта (в т.ч. в рамках трехмерной постановки задачи, учитывать эффекты конечной размерности излучателя и приемника и т.д.).

3. В работе в качестве зондирующего использовался пакет синусоидального сигнала 1.5 МГц длительностью в пять периодов. После излучения сигнала пьезокерамическим преобразователем генератор сигналов отключался и устройство регистрации и обработки проводило мониторинг отраженных импульсов. Выбранный размер окна составлял около 126 мкс и позволял захватывать до 2-х или 3-х отраженных импульсов и проводить по ним вычисление времени задержки.

4. В работе для расчета адиабатического параметра нелинейности численными методами специально на этом внимание не акцентировалось. Термодинамическое значение параметра нелинейности, полученное по данным NIST, может иметь отклонение до 5% (следствие погрешности использованных экспериментальных данных).

5. К нам поступали закрытые банки с химически чистыми веществами. Контролировался показатель преломления до проведения экспериментов, перед заправкой акустическая ячейка промывалась, сушилась, и уже далее туда заливалась ионная жидкость. После проведения экспериментов показатель преломления дополнительно контролировался и не демонстрировал изменений.

6. При проведении экспериментов с ионными жидкостями анализ спектров сигналов (без применения фильтрации и математической обработки) не показал наличие дополнительных гармоник (даже вторая гармоника не была детектирована).

7. Экспериментальные исследования нелинейных параметров для ионных жидкостей (в т.ч. в области высоких давлений) не проводились по причине отсутствия второй гармоники в спектре акустических сигналов.

На заседании 01.04.2026 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития акустики, присудить Беленькову Р.Н. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек из них 6 докторов наук по специальности 1.3.7. – Акустика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 17, против присуждения ученой степени — 0, недействительных бюллетеней — 0.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гурбатов Сергей Николаевич

Клюев Алексей Викторович

01.04.2026