**УТВЕРЖДАЮ**
Ректор Таджикского
технического университета
имени академика М.С. Осими,
д. э. н., профессор Давлатзода К.К.

«13» 02 2026г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Баладжонзода Сулаймонджона Додарджона на тему **«Исследование вязкоупругих и акустических свойств квазисферических и полярных жидкостей»,** представленной на соискание учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D060400-Физика (6D060403-Теоретическая физика)

Диссертационная работа Баладжонзода Сулаймонджона Додарджона на тему **«Исследование вязкоупругих и акустических свойств квазисферических и полярных жидкостей»**, представленная на соискание учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D060400-Физика (6D060403-Теоретическая физика) **соответствует паспорту научной специальности** 6D060403-теоретическая физика (физика и математика) в части п. 1. Теория конденсированного состояния макроскопических и микроскопических классических и квантовых систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем в части п. 5. Развитие теории и исследование общих свойств и законов нелинейной динамики неравновесных систем в части п. 6. Моделирование физических явлений.

Диссертационная работа Баладжонзода С.Д. посвящена теоретическому исследованию вязкоупругих и акустических свойств полярных и неполярных многоатомных жидкостей на основе молекулярно-кинетической теории жидких систем с квазисферическими молекулами. Большое внимание уделено описанию и определению вкладов, происходящих в жидкости, трансляционным

и структурным релаксационным процессам. Выделены случаи, когда потоки переноса затухают по степенному и экспоненциальному временному закону.

**Актуальность исследования обусловлена** тем, что жидкости являются одной из наиболее распространённых форм вещества в природе. Многие физические, химические, биологические и другие природно-технические процессы происходят в жидкостях или с участием жидкостей. Исследование физических свойств жидкостей важно и актуально не только в аспекте выяснения свойства самих жидкостей, но и в плане описания многих других явлений, происходящих в этих смежных областях.

Установлено, что свойства и значение ряда эксплуатационно-важных теплофизических и переносных параметров жидкостей при динамических процессах существенно отличаются от их таких же свойств при медленных и статических процессах. При этом степень влияния внешних возмущений на свойства жидкостей сильно зависит как от характера внешнего действия (от частоты возмущения $\omega$), так и от механизмов, происходящих в самих жидкостях внутренних релаксационных процессов (от время релаксации $\tau$). Например, при высокочастотных динамических процессах (когда $\omega\tau \to \infty$) жидкости ведут себя как упругое твёрдое тело, а при низкочастотных процессах (где $\omega\tau \to 0$) жидкости проявляют свойства текучей сплошной среды. Известно, что неравновесные свойства жидкостей при таких сложных динамических процессах теоретически можно адекватно описать только на основе строгих методов молекулярно-статистической теории жидкостей.

Однако следует отметить, что в настоящее время проблемы создания строгой и универсальной теории жидкого состояния вещества, способной в полной мере описывать динамические свойства жидкостей и механизмы происходящих в них молекулярных процессов, далеки ещё от завершения. Особенно открытыми пока остаются многие вопросы исследования неравновесных свойств сложных жидких систем.

С другой стороны, бурное развитие технологии и широкое использование жидкостей в качестве горючего, носителей тепла, хладагентов и смазочных

материалов в современных технологических процессах ставит задачу создания новых жидких материалов с заданными физико-техническими свойствами, в том числе с определёнными значениями теплофизических и переносных параметров.

В аспекте вышеизложенного тема рецензируемой диссертационной работы относится к актуальным проблемам физики жидкого состояния, имеющим большие фундаментально-научное и прикладное значения.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и предложений, изложенных в диссертации.** Несмотря на некоторые специфические трудности теоретического исследования жидкостей (отсутствие удобного малого параметра, одинаковые порядки энергии теплового движения и взаимодействия молекул, …) теория жидкого состояния успешно развивается и достигла определённых успехов. На ранних этапах исследования жидкости рассматривались плотные газы, для описания которых применялись законы, установленные для газов. Далее было установлено, что вблизи точки плавления многие свойства жидкостей сходны со свойствами твёрдых тел, и начинают развиваться различные квазикристаллические представления о жидкости, как о рыхлом твёрдом теле.

Новые более совершенные экспериментальные исследования структуры и свойства жидкостей показали, что жидкость — это не плотный газ и не рыхлое кристаллическое твёрдое тело, а специфическое состояние вещества с особенностями структуры и свойства. В связи с этими новыми представлениями о структуре и свойстве жидкостей, особенно с учётом наличия ближнего радиального порядка в жидкостях, уже к середине XX века была заложена основа строгих молекулярно-статистических теорий жидкого состояния вещества. Одним из известных и широко используемых направлений этих теорий является метод коррелятивных функций распределения молекул и связанный с ним метод кинетических уравнений.

С удовлетворением можно отметить, что данный подход нашел широкое распространение и развитие в Таджикистане. Начиная с 60-х годов прошлого

века под руководством академиков Адхамова А.А., Одинаева С. и их учеников была создана известная научная школа по молекулярно-кинетической теории жидкостей. Заметные результаты были получены в области исследования явлений переноса и релаксации, упругих и акустических свойств различных классов жидкостей. Успешно развивалось моделирование физических процессов в жидкостях методами молекулярной динамики и Монте Карло.

Рецензируемая диссертационная работа выполнена на основе результатов этой школы, и с большой уверенностью можно сказать, что приведённые в диссертации положения, выводы и предложения являются вполне обоснованными.

**Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:** выбором модельных потенциалов парного межмолекулярного взаимодействия, равновесной радиальной функции распределения и других молекулярных параметров, а также составлением алгоритма **проведены** численные расчёты зависимости коэффициенты трения $\beta$, времен релаксации, коэффициентов вязкости и модулей упругости полярных и неполярных многоатомных жидкостей от изменения термодинамических параметров состояния, от ориентации молекул и частоты возмущения; **выявлено**, что область частотной дисперсии динамических коэффициентов переноса и динамических модулей упругости, обусловленная структурными релаксационными процессами (диффузионными механизмами затухания), гораздо шире, чем область частотной дисперсии, связанная с трансляционными релаксационными процессами (с экспоненциальными механизмами затухания); анализировано асимптотическое поведение динамических коэффициентов вязкостей и соответствующие им динамические модули упругости в предельно высоких и предельно низких областях частот, а также в релаксационной области; результаты численных расчётов сопоставлены с экспериментальными данными и в большинстве случаев получены удовлетворительные согласия; сделаны соответствующие обоснованные выводы.

**Научная, практическая, экономическая и социальная значимость**

**результатов диссертации.** Полученные в диссертации результаты вносят заметный вклад в развитие теории неравновесных свойств сложных жидких систем при динамических процессах. Полученные в диссертации численные результаты по зависимости динамических параметров переноса (коэффициенты внутреннего трения, времена релаксации, коэффициенты вязкости, модулей упругости) от изменения температуры, плотности, давления и частоты внешнего воздействия могут быть использованы как банк данных при применении этих жидкостей в различных технологических процессах.

Оценить экономическую значимость теоретических исследований сложно, но проведя оценку и определение численных значений практически важных параметров жидкостей в различных условиях, в том числе в недоступных пока реальным экспериментам значениях параметров теоретические результаты позволяют экономно сократить расходы на создание и приобретение дорогостоящих приборов и на проведение капиталоёмких работ. Жидкость, в том числе вода – это основа жизни. Любое исследование жизненно важных объектов природы и общества имеет большую социально-гуманитарную значимость.

**Степень достоверности результатов исследования, точность и обоснованность результатов исследования** подтверждается высокой корректностью использованных аналитических выражений, кинетических уравнений для одно- и двухчастичных функций распределения, а также уравнениями типа уравнений Смолуховского для определения бинарных функций распределения молекул, подходящих потенциалов межмолекулярного взаимодействия, сопоставлением численных расчётов с экспериментальными данными и с результатами известных теорий.

**Личный вклад соискателя заключается** в выборе методов и разработке алгоритмов решения поставленных задач, определении основных закономерностей протекания динамических процессов в жидкостях, проведении численных расчетов, обработке, анализе и интерпретации результатов.

**Публикации результатов диссертации в рецензируемых научных журналах.** По результатам работы опубликовано 16 работ, из которых 5 статей в изданиях из Перечня ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 11 работ в материалах международных и республиканских конференций и в других изданиях.

Содержание диссертации изложено на 140 страницах машинописного текста. Работа хорошо иллюстрирована, результаты исследований отражены на 31 рисунке и в 9 таблицах. Автореферат диссертации в полной мере отражает материалы диссертации и публикаций.

**Структура и содержание диссертации**. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и рекомендаций, списка цитированной литературы и собственных публикаций.

**Во введении** общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены степень изученности научной проблемы, объект и предмет исследования, цель и задачи, теоретическая и методологическая основы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** приведен краткий обзор теоретических и экспериментальных работ, а также компьютерное моделирование, соответствующие теме диссертации.

**Во второй главе** на основе кинетических уравнений для одно- и двухчастичной функций распределения, учитывающих вклады пространственной корреляции плотности и корреляций скоростей, получены уравнения обобщенной гидродинамики жидкостей, коэффициенты вязкости и упругие модули, которые микроскопически зависят от пространственных и временных масштабов. Релаксирующие потоки в уравнениях обобщенной гидродинамики состоят из кинетических и потенциальных частей, которые обеспечивают учет вкладов внутренних релаксационных процессов. Получено замкнутое уравнение для одночастичной функции распределения и уравнения Смолуховского для бинарной плотности частиц в конфигурационном

пространстве и найдено его общее решение. Полученные аналитические выражения для коэффициентов объемной и сдвиговой вязкостей, а также динамических модулей объемной и сдвиговой упругости на основе этих уравнений содержат вклады как трансляционной, так и структурной релаксации, если восстановление равновесной структуры раствора происходит как по степенному, так и по экспоненциальному законам.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию кинетических коэффициентов сдвиговой и объемной вязкостей, а также динамических модулей сдвиговой и объемной упругости и проведению численных расчетов при определенном выборе модели многоатомных жидкостей с квазисферическими молекулами и полярных жидкостей. Результаты численных расчетов вязкоупругих свойств, рассмотренных жидкостей в широком интервале изменения термодинамических параметров состояния и частот приведены в виде графиков и таблиц, а также по возможности проведены сравнения с имеющимися экспериментальными данными.

**В четвертой главе** на основе системы уравнений обобщенной гидродинамики, учитывающих вклады как структурных, так и трансляционных релаксационных процессов, определены явные молекулярные выражения для скорости и коэффициента поглощения акустических волн в жидкостях. Исследована частотная дисперсия этих акустических параметров для многоатомных жидкостей с квазисферическими молекулами и полярных жидкостей с учетом вклада процесса структурной релаксации и проведён численный расчет полученных выражений. Полученные результаты сопоставлены с результатами общей релаксационной теории и имеющимися экспериментальными данными.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что тема диссертационного исследования является актуальной и соответствует требованиям, предъявляемым к квалификационным научно-исследовательским работам. Полученные в ходе исследования результаты обладают значительной научно-практической ценностью и вносят существенный вклад в развитие

методов изучения явления переноса, упругих и акустических свойств жидкостей, имеющих широкое применение в теоретической и прикладной физике.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается строгим обоснованием используемых теоретических методов и численных расчетов, включая соответствие экспериментальным и теоретическим данным, представленным в литературе. Проведённые расчёты и сравнительный результат с экспериментальными литературными данными демонстрируют хорошую точность. Результаты диссертационного исследования прошли широкую апробацию в ведущих научных учреждениях.

Структура диссертации логично выстроена, отвечает современным научным требованиям и обеспечивает последовательное и обоснованное изложение проведённого исследования. Комплексный подход к точности и обоснованность результатов исследования подтверждаются высокой корректностью использованных кинетических уравнений для функций распределения, уравнения для бинарной плотности, использованных потенциалов межмолекулярного взаимодействия и радиальной функции распределения, а также численных расчётов, хорошо согласующихся с экспериментальными данными и принципами общей релаксационной теории.

**Оформление работы полностью соответствует требованиям** Инструкции о порядке оформления диссертаций и авторефератов, утверждённой решением Президиума ВАК при Президенте Республики Таджикистан от 27 декабря 2024 года (№493). Также оно соответствует положениям Приложения 2 к постановлению Правительства Республики Таджикистан №267 от 30 июня 2021 года (в редакции постановления №295 от 26 июня 2023 года), регламентирующего порядок присуждения учёных степеней.

**Научная квалификации соискателя** Баладжонзода Сулаймонджона Додарджона соответствует представленной научной специальности 6D060400-Физика.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, отличается глубиной анализа, оригинальностью подходов и значимостью полученных результатов. Работа имеет выраженную междисциплинарную направленность, объединяет передовые методы теоретической физики и вычислительных подходов.

**Замечания и предложения**. Наряду с хорошими полученными научными результатами в диссертации встречается ряд недостатков и упущений:

1. В численных экспериментах и аналитических исследованиях диссертации преимущественно использованы безразмерные величины (например, частота). Для практической реализации и возможного лабораторного тестирования полученных результатов целесообразно было бы провести дополнительные исследования с учётом физических размерностей. Это позволило бы упростить процесс сопоставления результатов экспериментальными данными.

2. Обзор литературы в главе 1 и описание существующих методов исследования в главе 2 могли бы быть объединены в более компактный раздел, что позволило бы сделать изложение более структурированным. Было бы более целесообразным концентрировать обзор на используемые непосредственно в диссертации вопросы, опуская неимеющие прямого отношения к диссертации работы.

3. Судя по автореферату и диссертации, с целью облегчения численных расчётов для многоатомных жидкостей проводятся различные формы упрощения полученных общих аналитических выражений. Естественно, при каждом упрощении часть исходной информации теряется. Было бы целесообразно с учетом возможности современных методов провести численные расчёты по более общим аналитическим выражениям;

4. Было бы хорошо, если в третьей и четвёртой главах при проведении численных расчетов вязкоупругих и акустических свойств многоатомных и полярных жидкостей были оценены и сопоставлены вклады кинетических и потенциальных частей коэффициентов переноса и модулей упругости.

5. В тексте и в аналитических выражениях диссертации и автореферата встречаются отдельные стилистические и орфографические ошибки, и технические упущения.

Имеющиеся недостатки не снижают значимость полученных в диссертации основных научных результатов. Учет и устранение этих и других замечаний позволяет уменьшить недостатки, повысить качество научных исследований, корректировать направление научных работ и содержание получаемых результатов.

Автореферат диссертации подготовлен в соответствии с установленным порядком получения учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D060400-Физика, полностью отражает основное содержание диссертации и опубликованных работ.

**Заключение по диссертации.** В целом, диссертация Баладжонзода Сулаймонджона Додарджона на тему **«Исследование вязкоупругих и акустических свойств квазисферических и полярных жидкостей»** для получения учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D060400-Физика (6D060403-Теоретическая физика) является выполненной на высоком уровне, завершённым научным исследованием по актуальной теме - физики жидкого состояния. По объёму и содержанию отвечает предъявляемым к диссертациям доктора PhD требованиям.

Диссертация соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии при Президенте Республики Таджикистан и ее автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D060400-Физика (6D060403-Теоретическая физика).

Отзыв подготовлен в соответствии с пунктами 76-79 и 81 Порядка присуждения учёных степеней, утверждённых постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года, № 267.

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры «Физика» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, протокол № 6 от 10 февраля 2026 года. На семинаре присутствовали: 15

человек.

Результаты голосования: за - 15 человек, против - нет, воздержавшихся - нет.

Председатель заседания: _____ Насриддинов А.С. - кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Эксперт: _____ Исмоилзода И.Б. - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Секретарь заседания: _____ Аминов Ш.А. - кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Подписи Насриддинова А.С., Исмоилзода И.Б. и Аминова Ш.А. **заверяю:**
**Начальник управления кадров**
**и специальных работ**
**ТТУ имени академика М.С. Осими** _____ **Кодирзода Н.Х.**

Контактная информация: Адрес: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10 Официальный сайт: https://www.ttu.tj Электронная почта: info@ttu.tj, ikromjon.bomurodi92@mail.ru, Телефон: +992 (37) 221-35-11, (+992) 935592221

12.02.2026