



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе и инновациям
Восточно-Сибирского государственного
университета технологий и управления
Д.Т.Н., проф.

Д. В. Шалбуев
2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
федерального государственного бюджетного образовательного учрежде-
ния высшего образования «Восточно-Сибирский государственный
университет технологий и управления»
на диссертацию **Шоайдарова Насратшо Бороншоевича**
«Молекулярно-статистическое исследование динамических вязкоупру-
гих свойств одноатомных и многоатомных жидкостей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного
состояния

Актуальность темы диссертации. Всесторонние экспериментальные и теоретические исследования структуры жидкостей, их вязкоупругих и теплофизических свойств, выявление релаксационных процессов, протекающих в них имеет фундаментальное значение для физики жидкого состояния вещества.

Основным и характерным свойством жидкостей является их текучесть. Поэтому часто при практическом использовании жидкостей возникает необходимость знания их вязкоупругих свойств. Установлено, что вязкоупругие свойства жидкостей при высокоинтенсивных и высокочастотных внешних воздействиях существенно отличаются от их аналогичных свойств при медленных и статических процессах. Оказалось, что одни и те же внешние возмущения по-разному влияют на вязкоупругие свойства жидкостей. Влияние внешних возмущений на жидкости зависит от их структурных особенностей и характера происходящих в них внутренних релаксационных процессов. Основной целью диссертационной работы является обобщение и использование метода неравновесной функции распределения (НФР) для описания неравновесных процессов, происходящих в одноатомных и многоатомных жидкостях и исследование динамических вязкоупругих свойств этих жидких систем с учётом угловых ориентаций их молекул и вкладов, происходящих в них внутренних термических релаксационных процессов, в широком диапа-

зоне изменения термодинамических параметров состояния и частоты внешнего возмущения.

Работа является теоретической, и автор принял за решение сложной проблемы физики жидкого состояния – молекулярно-статистического описания неравновесных свойств сложных жидких систем. Следует отметить, что для реализации поставленных целей в диссертации автором использованы оптимальные физические модели сложных жидкостей и метод молекулярно-статистического описания сложных асимметрических жидких систем.

В последние годы метод НФР успешно используется для исследования неравновесных свойств различных конденсированных систем. Параллельное использование декартовых и угловых координат для определения положения несферических молекул, также является одним из удачных подходов в решении поставленных в диссертации задач. Четкое обоснование темы, корректное определение цели, удачный выбор модели и последовательное применение современных методов молекулярно-статистического описания неравновесных свойств жидкостей позволили диссертанту получить **достоверные** аналитические результаты, упростить сложные аналитические выражения и применить их для исследования динамических вязкоупругих свойств одноатомных и многоатомных жидкостей. Поэтому тема диссертационной работы «Молекулярно-статистическое исследование динамических вязкоупругих свойств одноатомных и многоатомных жидкостей» **является актуальной**.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация изложена на 123 страницах машинописного текста, включая 20 рисунков, 12 таблиц и списка литературы из 128 наименований.

Во введении научно обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, проанализировано состояние изученности исследуемых в диссертации проблем, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен подробный анализ состояния экспериментальных и теоретических работ по исследованию вязкоупругих свойств жидкостей. Основное внимание уделено тем экспериментальным и теоретическим работам, в которых рассматриваются вклады термических релаксационных процессов в вязкоупругие свойства жидкостей.

Во второй главе приведены основные понятия и принципы статистического описания сложных жидких систем. Рассматривается жидкая система, состоящая из N одинаковых, жёстких молекул произвольной формы с массой m и моментом инерции $I_{\alpha\beta}$. Предполагается, что такие молекулы имеют только поступательные и вращательные степени свободы, которых можно

описать законами классической физики. Для определения положения таких несферических молекул в фазовом пространстве, используются наборы декартовых и угловых координат.

Неравновесное состояние жидкой системы в фазовом пространстве описывается набором динамических величин, уравнения временного изменения, которых имеют вид законов сохранения. Усреднением уравнения баланса этих динамических величин по соответствующему статистическому ансамблю, определяются уравнения обобщенной гидродинамики, позволяющие исследовать динамические процессы переноса в рассматриваемой модели жидкости.

Вязкоупругие свойства жидкостей обусловлены переносом импульса и момента импульса. В силу этого в качестве основных динамических величин, характеризующих неравновесное состояние жидкости выбраны компоненты тензоров переноса импульса и момента импульса.

Получена замкнутая система уравнений обычной гидродинамики с учетом пренебрежения диффузионных и термоупругих процессов и определены аналитические выражения для 8 модулей упругости, обусловленных поступательными и вращательными степенями свободы молекул, а также взаимодействиями этих степеней свободы.

В третьей главе определены релаксационные источники и сформулированы уравнения обобщенной гидродинамики для исследования динамических вязкоупругих свойств асимметричных жидкостей. Проведён анализ происходящих в жидкости релаксационных процессов. Показано, что входящие в систему уравнений обобщенной гидродинамики характерные времена релаксации, в конечном счете, могут быть сведены к трансляционному, вращательному и характерному времени релаксации, обусловленных взаимодействием трансляционных и вращательных степеней свободы молекул.

Упрощенные аналитические выражения, полученные для жидких систем, в которых обмен энергией между одинаковыми степенями свободы происходит быстрее, чем обмен энергией между различными степенями свободы, применены для описания динамических вязкоупругих свойств простых одноатомных жидкостей. Полученные результаты численного расчёта зависимости времени трансляционной релаксации, коэффициента внутреннего трения, динамических коэффициентов вязкостей и соответствующие им динамических модулей упругости жидкого аргона от температуры, плотности и частоты проявляют удовлетворительные согласия с экспериментальными результатами.

В четвёртой главе получены упрощенные аналитические выражения для жидких систем, в которых обмен энергией между различными степенями свободы происходит быстрее, чем обмен энергией между одинаковыми сте-

пенями свободы молекул, использованные для описания динамических вязкоупругих свойств многоатомных жидкостей. Показано, что в определении динамических вязкоупругих свойств многоатомных жидкостей вносят вклад все три основные релаксационные процессы, но определяющим является так называемый обменный процесс, обусловленный взаимодействием между поступательным и вращательным степенями свободы молекул жидкости.

Установлено, что в отличие от одноатомных жидкостей в многоатомных жидкостях имеют место как минимум две релаксационные области. Рассмотрены асимптотические поведения динамических коэффициентов вязкостей и соответствующих им динамических модулей упругости в областях предельно высоких и предельно низких частот воздействия. Показано, что при низкочастотных динамических процессах вязкоупругие свойства жидкостей определяются низкочастотными значениями коэффициентов вязкостей, а при высокочастотных процессах высокочастотными значениями модулей упругости.

На основе анализа и сопоставления результатов численных расчётов показано, что в определении закономерности зависимости динамических вязкоупругих параметров жидкостей от изменения термодинамических параметров состояния определяющую роль играет потенциальная энергия взаимодействия молекул.

В заключении приводятся результаты работы и выводы, сделанные на основе приведенных исследований.

К значимым результатам работы, обладающие научной новизной можно отнести следующее:

1) получена замкнутая система уравнения обобщённой гидродинамики для компонент тензоров вязких напряжений и на основе её решения получены упрощённые аналитические выражения для динамических вязкоупругих параметров одноатомных и многоатомных жидкостей;

2) проведён детальный анализ молекулярных механизмов внутренних термических релаксационных процессов и установлено, что в многоатомных жидкостях могут реализоваться как трансляционные, так и вращательные релаксационные процессы, а также релаксационные процессы связанные с взаимодействием поступательных и вращательных степеней свободы молекул.

3) показано, что полученные результаты с учётом только трансляционных релаксационных процессов удовлетворительно описывают динамические вязкоупругие свойства простых одноатомных жидкостей;

4) рассмотрены асимптотические поведения динамических вязкоупругих параметров жидкостей при предельно низкочастотных и предельно высокочастотных динамических процессах;

5) установлено, что в одноатомных жидкостях имеет место одна релак-

сационная область с характерным временем релаксации τ_{tt} , а в многоатомных жидкостях имеет место, как минимум, две релаксационные области;

б) составлен алгоритм и проведены численные расчёты зависимости динамических вязкоупругих параметров одноатомных и многоатомных жидкостей от температуры и плотности.

Практическая значимость результатов подтверждается возможностью их использования для оценки и определения значения вязкоупругих и других теплофизических характеристик простых и многоатомных жидкостей при различных динамических процессах.

Аналитические выражения и численные значения коэффициентов внутреннего трения и характерных времён релаксации могут быть использованы для анализа и определения и других теплофизических параметров простых и многоатомных жидкостей, в том числе акустических параметров.

Материалы диссертации могут быть использованы докторантами, аспирантами, соискателями, магистрами и студентами старших курсов физических, физико-химических и технологических специальностей, при выполнении ими научных и дипломных работ.

Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации. Выводы и заключения обоснованы. Выделенные в качестве новизны и практической значимости результаты соответствуют содержаниям глав диссертации. По результатам диссертации опубликованы 18 научных работ (4 из которых в журнале перечня ВАК РФ). Следует отметить достаточную апробацию основных результатов диссертационной работы. Личный вклад автора в получении экспериментальных и теоретических результатов и в их обобщении неоспорим.

Замечания и предложения

1. Во второй главе в качестве сохраняющихся динамических величин, характеризующих неравновесное состояние жидкости использованы динамические плотности, число молекул и внутренняя энергия жидкости. Для жидкостей со сложными формами молекул импульс и собственный момент импульса молекул не сохраняются, но сохраняется полный механический момент импульса. В диссертации нет информации о законе сохранения полного момента импульса.

2. Использование значения только кинетических частей равновесных корреляторов компонент тензоров импульса и момента импульса молекул, при получении упрощённых аналитических выражений для характерных времён релаксации в третьей главе видимо является несколько грубым приближением.

3. Недостаточно обосновано использование выражения равновесной радиальной функции распределения сферических молекул для проведения

численных расчётов динамических вязкоупругих параметров многоатомных жидкостей (четвёртая глава).

4. В диссертации имеют место стилистические, технические и грамматические ошибки. Наблюдаются перепутывание индексов (см. фор.-3.15)

5. В автореферате наблюдается разные оформления подписи к рисункам (см. рис 1. стр. 15).

Заключение

Приведенные замечания к работе, встречающиеся в диссертации незначительные стилистические, орфографические и технические ошибки не снижают ее научной ценности и практической значимости. В целом рецензируемая диссертационная работа представляет собой законченную научную работу, выполненную на актуальную тему, выводы аргументированы, полученные результаты достоверны и оригинальны.


На основании вышеизложенного считаем, что работа «Молекулярно-статистическое исследование динамических вязкоупругих свойств одноатомных и многоатомных жидкостей» удовлетворяет требованиям п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Шоайдаров Насратшо Бороншоевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании кафедры физики «Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления», протокол № 6 от 31.01.2023 г.

Профессор кафедры физики ВСГУТУ, д.т.н.

(1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»),  Б. Б. Бадмаев

Профессор кафедры физики ВСГУТУ, д.ф.-м.н.

(1.3.8 «Физика конденсированного состояния»),  Б. Г. Базаров

31.01.2023 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д.40В, строение 1, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ); e-mail: office@esstu.ru; телефон (Общий отдел) (3012)41-14-15; факс: (3012)41-71-50.

