

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационное исследование Абдурасулова Анвара Абдурасуловича «Статистическая теория релаксационных явлений и динамических процессов переноса в жидкостях с произвольными формами молекул», представленное на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Актуальность темы исследования. Жидкое состояние это промежуточное между газовым и твёрдым состоянием вещества. Многие установленные для жидкостей закономерности могут быть полезными и для описания свойства газов и твёрдых тел, особенно вблизи областей испарения и плавления. При применении жидкостей в качестве рабочего материала в высокоинтенсивных динамических процессах они подвергаются широким спектром внешних воздействий. Теплофизические, особенно переносные свойства жидкостей при высокоинтенсивных динамических процессах существенно отличаются от соответствующих свойств при медленных или статических процессах. Например, установлено, что переносные свойства жидкостей, при низкочастотных динамических процессах, когда $\nu\tau \ll 1$ (τ - характерное время внутренних релаксационных процессов, ν - частота внешнего возмущения) характеризуются низкочастотными (статическими) значениями коэффициентов переноса, а при высокочастотных процессах, когда $\nu\tau \gg 1$, высокочастотными значениями соответствующих модулей упругости. В областях релаксации, где $\nu\tau \sim 1$, переносные свойства жидкостей определяются, как динамическими значениями коэффициентов переноса, так и динамическими значениями соответствующих им модулей упругости.

Теоретически теплофизические и переносные свойства жидкостей при динамических процессах можно описать на основе уравнения обобщённой (релаксационной) гидродинамики, которые формулируются на основе строгих принципов молекулярно-статистической теории жидких систем. Сейчас в большинстве случаев используются результаты молекулярно-статистической теории простых жидкостей, состоящие из упругих молекул сферической формы.

В рецензируемой диссертационной работе сделаны попытки формулировки молекулярно-статистической теории более сложных жидких систем на основе более общей модели жидкостей, состоящие из жёстких молекул произвольной формы, и обобщения известного метода

неравновесных функции распределения молекул для описания динамических процессов переноса и релаксации в сложных жидких системах.

В аспекте вышеизложенного тема диссертационной работы актуален как из точки зрения развития фундаментальной теории жидкого состояния, так и с позиции исследования практически важных свойств жидкостей.

Методы и объекты исследования являются классическими и в том или ином аспекте изучены многими авторами. Однако предложенная диссертантом модель жидкой системы, состоящей из жёстких молекул произвольной формы, отличается значительным увеличением числа динамических величин, характеризующих неравновесное состояние системы, а также более корректным учётом угловых координат для определения положения несферических молекул в пространстве. Выражение НФР, применённое для описания динамических процессов переноса в сложных жидких системах, является относительно новым. Полученные автором диссертации результаты на основе этой модели также являются новыми и в ряде случаев приведены впервые. В частности,

1. **Предложена** более общая модель сложных жидкостей, состоящая из одинаковых жёстких молекул произвольной формы, чем модель простых жидкостей, состоящих из упругих сферических молекул.

2. Метод НФР **обобщён** для описания динамических процессов переноса и релаксационных явлений в сложных асимметричных жидкостях за счёт значительного увеличения числа динамических величин, характеризующих неравновесное состояние жидкой системы, и учёта угловых координат для описания положения несферических молекул в фазовом пространстве.

3. **Сформулирована** замкнутая компактная система уравнений баланса динамических величин, характеризующих неравновесное состояние жидкой системы, а также выражение для НФР, которые позволяют корректно учитывать вклады как гидродинамических, так и релаксационных источников в временную эволюцию динамических параметров состояния жидкой системы при равновесных, локально равновесных и неравновесных процессах.

4. **Получена** замкнутая система уравнений обобщённой гидродинамики, позволяющая исследовать динамические процессы переноса массы, импульса и момента импульса в сложных асимметричных жидкостях с учётом вкладов внутренних термических релаксационных процессов и частоты внешних возмущений.

Полученные в диссертации уравнения и аналитические выражения обоснованы, выводы и заключения аргументированы. Достоверность результатов обеспечена использованием апробированных методов исследования и сравнением с результатами известных теорий и экспериментальными данными. Также проведено сравнение значений одних и тех же величин, полученных в разное время разными методами, а также известных частных результатов, выведенных из общих выражений при предельных переходах.

Результаты диссертационной работы обсуждены более чем на 30 международных, региональных и республиканских научных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 86 работ, из которых 32 — в рецензируемых научных журналах.

Основное содержание диссертационной работы включает аналитические расчёты, вывод уравнений и их решений, анализ и оформление результатов в диссертации и научных публикациях, а также выводы и заключения, выполненные лично диссертантом. Диссертация изложена на 253 страницах компьютерного набора, содержит 52 рисунка и 40 таблиц. Список литературы включает 304 источника.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы. Кратко проанализировано состояние научных исследований по направлению темы диссертации, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ состояния экспериментальных и теоретических исследований явлений переноса и релаксации в однокомпонентных жидкостях. Подробно рассмотрены результаты молекулярно-статистического описания этих явлений. Приведены основные определения и аналитические выражения, составляющие методическую основу диссертации.

Во второй главе приведены описания основных понятий, определений, физической модели, а также принципов и методов исследования явлений переноса и релаксации в сложных асимметричных жидких системах, используемых в диссертации.

Рассмотрена жидкая система, состоящая из N одинаковых жёстких молекул произвольной формы с массой m и моментом инерции I . Для описания состояния таких несферических молекул в фазовом пространстве использован набор декартовых и угловых координат, а также

соответствующих им компонентов импульса и собственного момента импульса молекул. Предполагается, что молекулы обладают поступательными и вращательными степенями свободы — свойствами, которые можно описать законами классической физики. Далее схема метода НФР обобщается для описания явлений переноса в такой жидкой системе.

В третьей главе определены релаксационные источники и сформулирована замкнутая система уравнений обобщённой гидродинамики для плотностей векторов потока числа частиц и тензоров вязких напряжений, обусловленных трансляционными и вращательными степенями свободы молекул, а также взаимодействиями между этими степенями свободы. Показано, что полученная система уравнений обобщённой гидродинамики является более общей, относительно простой и удобной для использования. В ней содержатся результаты многих известных исследований, описанных в литературе.

В четвёртой главе рассмотрена жидкая система, в которой обмен энергиями между одинаковыми степенями свободы молекул происходит значительно быстрее, чем обмен энергиями между различными степенями свободы. Математически это выражается соответствующим условием. Выяснено, что в этом случае динамические процессы переноса трансляционными степенями свободы в пространстве координат и вращательными степенями свободы в пространстве углов протекают независимо друг от друга.

Упрощённая с учётом этого условия часть уравнений обобщённой гидродинамики, в которой определяющую роль играют трансляционные степени свободы и трансляционные релаксационные процессы, использована для описания динамических процессов переноса массы и импульса в простых одноатомных жидкостях.

Заметим, что простые одноатомные жидкости здесь успешно использованы в двух целях:

1. Для иллюстрации того, что полученные в диссертации результаты являются более общими и включают в себя результаты теории жидкостей со сферическими молекулами.
2. Многие теплофизические и переносные свойства жидкостей носят общий характер, и их удобнее демонстрировать на примере простых жидкостей.

В пятой главе рассмотрена жидкая система, в которой обмен энергиями между одинаковыми степенями свободы молекул происходит

медленнее, чем обмен энергиями между различными степенями свободы молекул. Показано, что в этом случае динамические свойства параметров переноса в основном описываются перекрёстным релаксационным процессом с характерным временем релаксации, однако и другие релаксационные процессы также вносят свой вклад.

В литературе, а также автором диссертации отмечена сложность выполнения условия ($\tau_r, \tau_r \gg \tau_{cr}, \tau_{cr}$) для простых многоатомных жидкостей. Тем не менее, применение этого условия для упрощения замкнутых систем уравнений обобщённой гидродинамики, приведённых в диссертации, позволило получить ряд интересных научных результатов. В частности, выявлена возможность появления дополнительных коэффициентов переноса и соответствующих модулей упругости, связанных с несферичностью молекул в многоатомных жидкостях. Выяснено, что кривые дисперсии динамических коэффициентов переноса и динамических модулей упругости многоатомных жидкостей содержат как минимум две релаксационные области.

В шестой главе приведены результаты термодинамического и молекулярно-статистического описания равновесных и неравновесных ориентационных теплофизических свойств нематических жидких кристаллов (НЖК). Более подробно исследованы аномальные ориентационные свойства теплоёмкости НЖК в окрестности точки фазового перехода НЖК — ИЖ (изотропная жидкость). Предложено выражение, позволяющее описать закономерности зависимости теплоёмкости НЖК от температуры, плотности и давления как в нематической, так и в изотропной фазах. Результаты теоретических расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Проведено термодинамическое и молекулярно-статистическое исследование ориентационных упругих свойств НЖК при деформациях типа поперечного изгиба (splay), кручения (torsion) и продольного изгиба (bend). Полученные результаты демонстрируют хорошее согласие как между собой, так и с экспериментальными данными.

Упрощённая с учётом условия система уравнений обобщённой гидродинамики, в которой определяющую роль играют вращательные релаксационные процессы, использована для исследования динамических процессов переноса массы и момента импульса, а также вращательных релаксационных явлений в НЖК. Определены аналитические выражения и проведены численные расчёты закономерностей зависимости характерного

времени вращательной релаксации, коэффициентов вращательного внутреннего трения, вращательной диффузии, ориентационных вязкостей и соответствующих динамических ориентационных модулей упругости НЖК от температуры и плотности. Полученные результаты качественно соответствуют существующим данным.

В конце каждой главы приведена краткая аннотация её результатов. В разделе «Выводы и рекомендации» отражены основные научные результаты диссертации и возможности их практического применения. Работа носит теоретический характер. В ней предложена физическая модель и метод исследования динамических процессов переноса в сложных жидких системах, которые могут стать основой для новых научных исследований и решения прикладных задач. Например, в диссертации все основные физические параметры жидкостей выражены через массу, размер, энергию взаимодействия и другие молекулярные параметры, что может служить физической основой для создания новых жидких материалов с заданными физико-техническими свойствами.

Выражения и формулы для параметров приведены в удобной для численных расчётов безразмерной форме. Проведены численные расчёты зависимости параметров переноса различных классов жидкостей от изменения термодинамических параметров состояния и частоты внешних возмущений. Эти результаты могут быть использованы как база данных значений параметров при различных условиях эксплуатации.

Оригинальность текста диссертации составляет 75,02% (автореферата — 76,21%).

Вместе с тем, в диссертации встречаются некоторые неточности, недостаточно подробно описанные предположения и выражения, а также стилистические, технические и грамматические ошибки. Например:

1. Обзор можно было бы сократить, исключив, например, описание термоупругих свойств жидкостей, которые далее в диссертации не рассматриваются.
2. Не все параметры и операции вывода НФР во второй главе описаны достаточно подробно.
3. Математические выражения действительно сложны, и для их применения к реальным физическим процессам требуется значительное упрощение. В диссертации содержится множество физически обоснованных и математически прозрачных упрощений. Однако не приведены оценки вкладов некинетических частей

равновесных корреляторов потоков числа частиц, импульса и момента импульса в значения определяемых параметров переноса.

4. Коэффициенты переноса названы динамическими, однако их динамические (частотные) свойства исследованы сравнительно недостаточно.
5. В тексте и аналитических выражениях диссертации и автореферата встречаются отдельные техниче́ские, стилистические ошибки и упущения.

Приведённые замечания никоим образом не уменьшают научную и практическую значимость большого количества реальных научных результатов, представленных в диссертации.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Темы диссертационной работы соответствуют пунктам 1, 5, 6 паспорта специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика», которые гласят:

1. Теория конденсированного состояния макроскопических и микроскопических классических и квантовых систем. Исследование различных состояний вещества и физических процессов в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем.
5. Развитие теории и исследование общих свойств и законов нелинейной динамики неравновесных систем.
6. Моделирование физических явлений.

Автореферат диссертации соответствует требованиям Порядка присуждения учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года №267 для учёной степени доктора физико-математических наук, и на необходимом уровне отражает содержание диссертации. В нём приведены значимые результаты, их новизна, а также научная и практическая значимость.

В целом диссертационная работа Абдурасулова Анвара Абдурасуловича «Статистическая теория релаксационных явлений и динамических процессов переноса в жидкостях с произвольными формами молекул» представляет собой завершённое научное исследование по актуальной теме, выполненное на высоком научном уровне. Содержание текста и аналитические выражения в разделах диссертации изложены последовательно, научно и логично связаны. Выводы и предложения обоснованы и аргументированы.

Получённые в диссертации результаты, как по объёму, так и по научному уровню решённых задач, а также по теоретической и практической

значимости, соответствуют требованиям Высшей аттестационной комиссии при Президенте Республики Таджикистан. Автор, Абдурасулов Анвар Абдурасулович, достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Отзыв подготовлен в соответствии с пунктами 31-35 Порядка присуждения учёных степеней, утверждённых постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года, № 267.

Официальный оппонент:

Д.ф.-м.н., заведующий отделом

«Прикладной математики и механики»

Института математики им. А.Джураева

Национальной академии наук Таджикистана

Адрес: 734063, Таджикистан, Душанбе, Айни, 299/4

Тел: +992 939198960

E-mail: maruf1960@mail.ru



Кабилев М.М.

Подпись Кабилова М.М. заверяю

Начальник ОК



Малаева М.Р.

Адрес: Таджикистан, 734063,

г. Душанбе, улица Айни 299/4

Тел: (992) 372 - 25-80-89

Факс: (992) 372 - 21-49-11

E-mail: Mitas@mail.tj

12 сентября 2025г.