

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Зарифзода Афзалшоха Кахрамона «Молекулярная теория релаксационных процессов, динамических вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Зарифзода Афзалшоха Кахрамон посвящена построению молекулярно-кинетической теории явлений переноса, упругих и акустических свойств магнитных жидкостей с учетом влияния внешнего магнитного поля и вклада внутренних релаксационных процессов. В своем исследовании автор охватывает широкий спектр частот и поскольку в области высоких частот нарушается условие локального равновесия, возникает необходимость исследования релаксационных процессов. Тема исследования, несомненно, является актуальной не только с научной, но и с прикладной точек зрения, так как магнитные жидкости широко применяются в различных областях науки, техники, технологии, медицины и экологии, и до сих пор остаются многие нерешенные вопросы, связанные с динамическими процессами, происходящими в магнитных жидкостях. Достаточно указать такие проблемы, как наблюдение сильного магнитовязкого эффекта, эффекта Вейссенберга, быстрое падение вязкости с ростом градиента скорости течения.

Построение количественной теории магнитных жидкостей на основе статистических закономерностей связано с определенными трудностями, связанными с выбором соответствующих конкретных кинетических уравнений, описывающих неравновесные процессы, проблемы полного учета взаимодействия всех структурных единиц магнитных жидкостей и их взаимодействие с внешним магнитным полем и т.д.

2. Новизна и практическая значимость результатов исследования

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в работе выполнено комплексное исследование вязкостных, упругих и акустических свойств неэлектропроводящих и электропроводящих магнитных жидкостей на основе метода статистической теории. Получены аналитические выражения для динамических коэффициентов вязкости и модулей упругости неэлектропроводящих и электропроводящих магнитных жидкостей. Исследована частотная зависимость коэффициентов вязкости и

модулей упругости магнитных жидкостей с учетом вклада трансляционной и структурной релаксации. Исследованы процессы распространения и поглощения сдвиговых и магнитозвуковых волн в магнитных жидкостях в широком диапазоне измерения термодинамических параметров и частот.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные выражения для динамических коэффициентов вязкости и модулей упругости позволяют выявить природу движения частиц и исследовать неравновесную структуру магнитных жидкостей. Результаты исследования могут быть использованы для описания дисперсии скорости и поглощения акустических волн в магнитных жидкостях. Полученные выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости представляют большой интерес для обработки экспериментальных данных по вязкоупругим свойствам магнитных жидкостей и расчета последних в широком интервале изменения термодинамических параметров и частот.

Результаты, полученные автором диссертации, могут быть использованы в различных областях науки, техники, технологии, медицины, экологии и при чтении лекций в высших учебных заведениях.

3. Оценка содержания и завершенности диссертации и автореферата

Диссертационная работа Зарифзода А.К. состоит из введения, пяти глав, заключения и основных выводов и списка использованных источников. Содержание работы изложено на 225 страницах компьютерного текста, включая 2 таблицы, 47 рисунков и 330 цитированных источников. Автором в конце диссертации сделано заключение и приведены общие выводы по результатам всей работы.

Во введении обоснована актуальность темы и формулируются цель и задачи исследования, а также приводятся положения, выносимые на защиту. После прочтения введения складывается впечатление, что автор ясно осознает сформулированную проблему и методы ее решения. Представленный список апробаций работ показывает, что автор имеет достаточно широкую известность в научных кругах СНГ и зарубежья.

В первой главе приведен информационный обзор литературы и их критический анализ в области вязкостных, упругих и акустических свойств неэлектропроводящих и электропроводящих магнитных жидкостей. Отражен современный уровень исследований вязкостных и упругих свойств магнитных жидкостей и их применения в производстве. Отмечена преимущественная область применения магнитных жидкостей в технике и технологии. Также приведены теоретические и экспериментальные результаты по распространению акустических волн в магнитных жидкостях.

Отмечены преимущества и недостатки существующих теорий по исследованию вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей.

Во второй главе обоснован выбор модели двухкомпонентной магнитной жидкости, приведены исходные кинетические уравнения типа Фоккера-Планка для одночастичных и двухчастичных функций распределения, описывающих неравновесные процессы в магнитных жидкостях. Отмечено, что в структуре жидкости, в отличие от газов, имеется ближний порядок и ее количественной структурной характеристикой является радиальная функция распределения, связанная с двухчастичной функцией распределения. Двухчастичная функция распределения определяет вероятность распределения попарно связанных частиц в пространстве. Одночастичная функция распределения связана с двухчастичной функцией распределения, а для определения двухчастичной функции распределения необходимо знание трехчастичной и т.д. Чтобы разорвать возникающую цепочку, автор применяет суперпозиционное приближение Кирквуда, где трехчастичная функция распределения выражается посредством одночастичных и двухчастичных функций распределения. Далее на основе кинетических уравнений выведена система уравнений обобщенной гидродинамики для закона сохранения массы, импульса и энергии магнитной жидкости. Показано, что полученные уравнения по виду совпадают с уравнениями обычной гидродинамики, однако все входящие в уравнения параметры определены микроскопически. В уравнениях обобщенной гидродинамики содержится тензор напряжения магнитной жидкости, для которого приведено молекулярное выражение, состоящее из кинетической и потенциальной частей. Его кинетическая часть определяется посредством кинетических частей неравновесного давления и вязкого тензора напряжения, а потенциальная часть – функцией неравновесной бинарной плотности частиц магнитной жидкости. Далее из кинетических уравнений для одночастичной функций распределения получены уравнения для кинетических частей неравновесного давления и вязкого тензора напряжения. Также из кинетических уравнений для двухчастичных функций распределения получены уравнения типа Смолуховского для функции неравновесной бинарной плотности и приведены их решения. Именно знание вида функции бинарной плотности позволяет автору в дальнейшем исследовать структурные релаксационные процессы.

В третьей главе диссертации рассматривались вопросы, связанные с процессами переноса и упругих свойств неэлектропроводящих магнитных жидкостей. На основе микроскопического выражения тензора напряжения и

явного вида неравновесной бинарной плотности получены аналитические выражения для динамических коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости и соответствующих им релаксационного объемного и сдвигового модулей упругости магнитной жидкости. Отмечено, что первые слагаемые коэффициента сдвиговой вязкости и сдвигового модуля упругости учитывают трансляционную релаксацию в магнитной жидкости с характерными временами трансляционной релаксации. Потенциальные части коэффициентов вязкости и модулей упругости содержат функции Грина с характерными временами, определяющими вклад структурной релаксации в магнитной жидкости. Следовательно, релаксация сдвиговой вязкости и сдвигового модуля упругости в магнитной жидкости является как трансляционной, так и структурной, а релаксация объемной вязкости и объемного модуля упругости, только структурной. Показано, что последние слагаемые в выражениях для коэффициентов вязкости и модулей упругости учитывают вклад воздействия внешнего магнитного поля в вязкоупругие свойства магнитных жидкостей.

Далее проанализированы асимптотическое поведение коэффициентов вязкости и модулей упругости при предельно низких и высоких частотах. Найдены асимптотические формулы коэффициентов вязкости и модулей упругости, совпадающие по виду с результатами других авторов. Далее на основе обоснованного выбора вида потенциальных энергий взаимодействия между структурными единицами магнитной жидкости и радиальными функциями распределения приведены расчетные выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости, на основе которых проведена серия численных расчетов их зависимости от частоты, концентрации феррочастиц, температуры и напряженности внешнего магнитного поля. Результаты расчетов изображены в виде графических зависимостей и проведено их сравнение с теоретическими и экспериментальными литературными данными, находящимися с ними в хорошем согласии. Показано, что применение модели двухкомпонентной магнитной жидкости позволяло описать их вязкостные и упругие свойства в широком интервале изменения объемной концентрации магнитных частиц и существование сильного магнитовязкого и магнитоупругого эффектов.

В четвертой главе исследовались явления переноса и упругих свойств электропроводящих магнитных жидкостей. В этой главе электропроводящая магнитная жидкость рассматривается как многокомпонентная система, состоящая из проводящей жидкой основы, твердых магнитных частиц и вещества стабилизатора. Рассматривается двухжидкостная модель, в которой

из-за сильного различия массы и размеров магнитных частиц и молекулы несущей жидкости, подсистемы, состоящие из магнитных частиц и молекулы жидкой основы, считаются независимыми. Однако принимается во внимание, что феррочастицы и частицы стабилизирующего вещества тесно взаимодействуют между собой. Исходя из принятой модели получены исходные кинетические уравнения для одночастичных и двухчастичных функций распределения электропроводящей магнитной жидкости. Впоследствии из кинетических уравнений получается система уравнений обобщенной гидродинамики для электропроводящей магнитной жидкости. Далее, как для функций неравновесных бинарных плотностей частиц подсистем, так и для неравновесной бинарной плотности коррелирующих частиц магнитного материала и стабилизатора, получены уравнения Смолуховского в конфигурационном пространстве и приведены их решения.

На основе выражения тензора напряжения электропроводящей магнитной жидкости, содержащей функции неравновесных бинарных плотностей, получены аналитические выражения для динамических коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, а также объемного и сдвигового модулей упругости электропроводящих магнитных жидкостей, учитывающих трансляционную и структурную релаксационные процессы. Отмечено, что функция Грина, содержащаяся в выражениях для коэффициентов вязкости и модулей упругости, является медленно меняющейся по степенному закону функцией, поведение которой совпадает с поведением автокорреляционных функций. Проанализированы асимптотическое поведение коэффициентов вязкости и модулей упругости электропроводящей магнитной жидкости при низких и высоких частотах. Показано, что коэффициенты вязкости и модулей упругости изменяются по степенному закону.

На основе полученных аналитических выражений для коэффициентов вязкости и модулей упругости проведены численные расчеты их зависимости от частоты внешних воздействий, концентрации железных частиц и металлических добавок, температуры, напряженности магнитного поля и продемонстрированы в виде графических зависимостей. Отмечено, что одним из особенных свойств электропроводящих магнитных жидкостей на основе жидких металлов является слишком быстрый рост их вязкости с увеличением концентрации магнитных частиц и существенное уменьшение вязкости с введением определенных металлических добавок. Проведенные расчеты на основе теоретических формул показывают согласующееся с экспериментом быстрое возрастание вязкости с увеличением концентрации

магнитных частиц и заметное ее снижение с введением металлических добавок. Однако в некоторых экспериментах, где металлические добавки образуют интерметаллические соединения с магнитными частицами, наблюдается более сильное уменьшение вязкости, где в теоретических расчетах не наблюдается. Автор объясняет это тем, что, поскольку потенциальная энергия взаимодействия между феррочастицами и частицами стабилизатора выбраны в виде стандартного потенциала (6–12) Леннарда-Джонса, выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости более качественно могут описать их концентрационную зависимость в тех магнитных жидкостях, в которых частицы стабилизатора, механически прилипая к магнитным частицам, не образуют с ними интерметаллические соединения. Показано, что численные расчеты находятся в хорошем качественном согласии с литературными данными.

В пятой главе рассмотрены особенности распространения и поглощения акустических волн в магнитных жидкостях. Автором отмечено, что основные трудности, возникающие при исследовании акустических параметров магнитной жидкости, связаны с ее многокомпонентностью, поскольку для получения аддитивных выражений, учитывающих вклад каждой компоненты и их взаимодействия необходимо выполнить сложные математические вычисления. Поскольку при быстрых процессах многокомпонентную систему можно рассматривать как однокомпонентную, предполагая, что все ее компоненты движутся как одно целое, автор, используя средние гидродинамические и парциальные величины, уравнения движения многокомпонентной магнитной жидкости приводит к виду, аналогичному однокомпонентной жидкости. Далее на основе уравнения движения и намагниченности магнитной жидкости диссертант получает дисперсионное соотношение, описывающее модифицированную сдвиговую волну в магнитной жидкости. Из решения дисперсионного уравнения получаются выражения для спектра частот и затухания сдвиговых волн и рассматривается их асимптотическое поведение при низких и высоких частотах. Также, решая дисперсионное уравнение относительно комплексного волнового числа, диссертант получает аналитические выражения для скорости и коэффициента поглощения сдвиговых волн в магнитных жидкостях. Показано, что при низких частотах модифицированная сдвиговая волна превращается в волны альфвеновского типа. Рассмотрены условия, где поглощение на длине волны мало и возможно распространение сдвиговых волн в магнитных жидкостях. В дальнейшем диссертант декартовую систему координат и направление

внешнего магнитного поля выбирает так, что уравнения, описывающие возмущения параметров магнитной жидкости подразделяются на две системы независимых уравнений. Из первой системы получается дисперсионное уравнение, описывающее распространение сдвиговых волн в направлении оси x . Решение второй системы дает дисперсионные уравнения для быстрой и медленной магнитозвуковых волн. Далее, автор, решая дисперсионное уравнение для быстрой магнитозвуковой волны, получает аналитические выражения для скорости распространения и коэффициента поглощения продольных звуковых волн в магнитных жидкостях. На основе полученных выражений проведены численные расчеты зависимости скорости и коэффициента поглощения сдвиговых и магнитозвуковых волн от частоты, термодинамических параметров состояния системы, напряженности внешнего магнитного поля и рассмотрена анизотропия скорости и коэффициента поглощения звуковых волн в магнитных жидкостях. Продемонстрировано качественное согласие проведенных расчетов с экспериментальными данными.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и дает полное представление об основных научных и практических результатах, новизне и актуальности выполненной работы. Результаты диссертации полно представлены в виде научных публикаций, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в международную базу цитирования.

Диссертационная работа Зарифзода Афзалшоха Кахрамона представляется завершенным научным исследованием.

4. Достоверность и обоснованность полученных результатов и основных выводов, сформулированных в диссертации.

В диссертационной работе сформулированы 11 общих выводов, достоверность которых подтверждается результатами исследований, приведенных в диссертации и апробированных на международных и зарубежных и республиканских конференциях.

5. Замечания по содержанию диссертационной работы

1. В работе рассматривается двухкомпонентная магнитная жидкость и для упрощения задачи подсистемы считаются независимыми. Однако, твердые магнитные частицы при движении вносят возмущение в поток несущей жидкости и эти возмущения влияют на макроскопические свойства магнитной жидкости. Представляется, что учет взаимодействия подсистем повысило бы точность количественных результатов.
2. По-видимому, основной вклад в формирование вязкости и упругости магнитных жидкостей вносит диполь-дипольное взаимодействие

магнитных частиц. Однако детальное обсуждение этого вопроса в диссертации отсутствует.


3. Известно, что сдвиговые волны быстро затухают в жидкостях и поглощение на длину волны равно большому значению. В работе не объясняется, что какие механизмы поддерживают сдвиговую волну в магнитных жидкостях.
4. Автореферат диссертации перегружен громоздкими формулами и меньше уделено внимание на обсуждение физических процессов.
5. В работе имеются стилистические и терминологические погрешности.

Указанные замечания не снижают общего высокого мнения о проделанной работе.

Заключение

Диссертационная работа Зарифзода Афзалшоха Кахрамона «Молекулярная теория релаксационных процессов, динамических вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей» выполнена на актуальную тему и является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей паспорту научной специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния. Диссертация Зарифзода А.К. соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации за № 842 от 24.09.2013 г., а сам соискатель заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник лаборатории «Коррозионностойкие материалы» Института химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана, доктор химических наук, профессор

 В.Дж. Абулхаев



Подпись профессора В.Дж. Абулхаева заверяю:
старший инспектор отдела кадров
Института химии им. В.И. Никитина
НАН Таджикистана



Ф. Рахимова