

ОТЗЫВ

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

Вопросы исследования структуры и свойств жидкостей, изучение их неравновесного состояния и природы релаксационных процессов, протекающих в них с научной точки зрения и практической значимости, является одной из важнейших проблем физики конденсированного состояния. В настоящее время исследованию неравновесных свойств жидкостей на основе строгих методов статистической теории уделяется значительное внимание. Особенно кинетическая теория находит бурное развитие, на основе представлений и гипотез, основанных на строгих статистических закономерностях. Особое внимание направлено на построение статистической теории процессов переноса, вязкоупругих, термоупругих и акустических свойств жидкостей. Основные трудности, возникающие при решении этих задач, в основном связаны со сложной структурой жидкости, имеющей ближний радиальный порядок. По своей структуре и межмолекулярным силам жидкости проявляют как свойства газа, так и твердых тел. При медленных процессах в них преобладают вязкие свойства, а при быстрых процессах доминируют упругие свойства, характерные твердым телам. В связи с этим разработка молекулярно-статистических методов позволяет всесторонне описать свойства жидкостей с единой микроскопической точки зрения.

В последние годы, несмотря на существующие трудности в области статистической теории простых жидкостей, были достигнуты значительные успехи. Теперь все больше интерес исследователей смещается в сторону более сложных жидкостей, таких, как растворы жидкостей и коллоидные системы. Особый интерес среди коллоидных систем представляют магнитные жидкости, являющиеся взвесями наномангнитных частиц в несущей жидкости. Хотя исследованию физико-химических свойств магнитных жидкостей посвящено большое количество работ, все еще остаются нерешенными вопросы, связанные с динамическими процессами, протекающими в них. Мало исследованы вклады различных релаксационных процессов и внешнего магнитного поля на их физические свойства. Сложная картина межчастичных взаимодействий, проблема выбора функций распределения частиц, а также их динамический характер затрудняя исследования, осложняют построение адекватной модели, описывающей динамические процессы в магнитных жидкостях. В связи с этим исследование физических свойств магнитных жидкостей на основе молекулярно-кинетической теории с учетом вкладов различных релаксационных процессов является актуальной задачей.

Диссертационная работа Зарифзода Афзалшоха Кахрамона посвящена построению статистической теории явлений переноса, упругих и акустических свойств магнитных жидкостей. В своих исследованиях автор исходит из обобщенных кинетических уравнений для одночастичных и двухчастичных функций распределения и на их основе получает систему уравнений обобщенной

гидродинамики, которая используется для исследования неравновесных процессов в магнитных жидкостях.

Диссертантом выполнена большая систематическая работа по исследованию вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей с учетом различных релаксационных процессов и влияния внешнего магнитного поля, что дает основание признать вопросы, сформулированные в диссертации, научно ценными и практически значимыми.

Диссертационная работа Зарифзода А.К. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, отмечена научная и практическая значимость работы.

В первой главе дан подробный критический обзор литературных данных по вязкостным, упругим и акустическим свойствам неэлектропроводящих и электропроводящих магнитных жидкостей. Из приведенного обзора следует, что динамическое поведение коэффициентов вязкости, модулей упругости, процессов распространения и поглощения различных волн в магнитных жидкостях с учетом внешнего магнитного поля и вклады различных релаксационных процессов с единой молекулярно-кинетической точки зрения мало исследованы.

Вторая глава имеет наиболее важное значение в диссертации, поскольку в ней обоснован выбор модели исследуемой системы, обобщены исходные кинетические уравнения для одночастичных и двухчастичных функций распределения с учетом внешнего магнитного поля. Получена замкнутая система уравнений обобщенной гидродинамики магнитных жидкостей, с учетом внешнего магнитного поля и вклада внутренних релаксационных процессов. В эти уравнения входит тензор напряжения магнитной жидкости, для которой определено микроскопическое выражение, зависящее от молекулярных параметров системы. Кинетическая часть тензора напряжения содержит неравновесное давление и кинетическую часть вязкого тензора напряжения, для которых получены уравнения. Также для функции неравновесной бинарной плотности частиц, содержащейся в выражении для тензора напряжения, получено обобщенное уравнение Смолуховского и приведено его общее решение. Установлено, что процесс перестройки структуры в магнитных жидкостях имеет диффузионный характер и описывается непрерывным спектром времен релаксации. Функция Грина, которая является фундаментальным решением однородного уравнения Смолуховского, медленно изменяется по степенному закону $t^{3/2}$ и ее асимптотика совпадает с дальневременными асимптотиками автокорреляционных функций.

В третьей главе диссертант, используя выражения для тензора напряжения магнитной жидкости и решение уравнения Смолуховского для бинарной плотности, исследует вязкоупругие свойства неэлектропроводящих магнитных жидкостей. Получены аналитические выражения для динамических коэффициентов вязкости и модулей упругости. Установлено, что релаксация коэффициента сдвиговой вязкости и сдвигового модуля упругости является как трансляционной, так и структурной, в то время как релаксация коэффициента объемной вязкости и объемного модуля упругости является только структурной. Проанализированы асимптотическое поведение полученных выражений, как при низких, так и при высоких частотах. Установлено, что при низких частотах коэффициенты вязкости стремятся к статическим значениям по закону $\omega^{1/2}$,

объемный модуль упругости стремится к значению статического адиабатического объемного модуля, а сдвиговой модуль упругости к нулю по закону $\omega^{3/2}$. В пределе высоких частот коэффициенты вязкости стремятся к нулю по закону ω^{-1} , а модули упругости перестают зависеть от частоты. Проведенные асимптотические анализы показывают качественное соответствие полученных результатов с общими выводами статистической теории вязкоупругих свойств простых жидкостей.

При проведении численных расчетов самой сложной процедурой является выбор вида потенциальных энергий взаимодействия и радиальных функций распределения. Поскольку диссертант рассматривает двухкомпонентную магнитную жидкость, то для молекулярной подсистемы потенциальную энергию взаимодействия выбирает в виде потенциала Штокмайера, а для магнитной подсистемы эта энергия выбирается в виде суммы потенциала Леннарда-Джонса, диполь-дипольного взаимодействия магнитных частиц и их взаимодействия с внешним магнитным полем. Именно учет диполь-дипольного взаимодействия феррочастиц и их взаимодействия с внешним магнитным полем позволяют диссертанту в дальнейшем получить качественно хорошие результаты. Радиальная функция распределения для молекулярной подсистемы выбирается в виде решения уравнения Перкуса-Иевица.

После выбора потенциальных энергий и радиальных функций распределения аналитические выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости приведены к удобному виду для проведения численных расчетов. Показано, что выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости подобно выражению Бэтчелора можно записать в виде квадратичной зависимости по объемной концентрации и, если не учитывать квадратичную зависимость, они переходят в известное выражение Эйнштейна.

Далее проведен численный расчет зависимости коэффициентов вязкости и модулей упругости от частоты, термодинамических параметров системы и внешнего магнитного поля. Установлено, что дисперсия коэффициентов вязкости имеет широкий спектр, тогда как, согласно релаксационной теории, их дисперсия является узкой и проявляется при частоте $\sim 10^{10}$ Гц. Согласно численным расчетам с ростом объемной концентрации магнитных частиц и внешнего магнитного поля коэффициенты вязкости и модули упругости нелинейно возрастают, а с увеличением температуры уменьшаются. Результаты численных расчетов, а также их сравнение с существующими экспериментальными данными показывают правильность учета вклада различных внутренних релаксационных процессов, в частности структурной релаксации, протекающей в магнитных жидкостях.

Четвертая глава диссертации посвящена развитию молекулярно-кинетической теории процессов переноса и упругих свойств электропроводящих магнитных жидкостей. Приведены исходные кинетические уравнения для одночастичных и двухчастичных функций распределения электропроводящей магнитной жидкости на основе которых выведена система уравнения обобщенной гидродинамики многокомпонентной системы. Показано, что в выражении тензора напряжения наряду с функциями бинарных плотностей каждой подсистемы содержится также функция бинарной плотности коррелирующих частиц магнитного материала и стабилизатора. Для их определения получены уравнения Смолуховского и приведены их общие решения. На основе микроскопического выражения тензора напряжения получены динамические выражения для

коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, а также объемного и сдвигового модулей упругости электропроводящей магнитной жидкости с учетом влияния внешнего магнитного поля. Проанализировано их асимптотическое поведение, как при низких, так и при высоких частотах, а также проведены численные расчеты их зависимости от частоты, внешнего магнитного поля и термодинамических параметров системы. Проведенные исследования показывают, что увеличение концентрации железных частиц приводит к резкому возрастанию вязкости электропроводящих магнитных жидкостей, а металлические добавки, напротив, уменьшают их вязкость. С возрастанием напряженности внешнего магнитного поля, значения коэффициентов вязкости и модулей упругости электропроводящих магнитных жидкостей увеличивается, однако повышение температуры приводит к их уменьшению.

В пятой главе диссертант исследует процессы распространения и поглощения различных волн в магнитных жидкостях. Получено дисперсионное соотношение, из решения которого получены выражения для спектра частот и затухания сдвиговых волн. Рассмотрены их асимптотическое поведение при предельно низких и высоких частотах. Показано, что в гидродинамическом режиме спектр частот зависит от волны альфвеновского типа, и затухание сдвиговых волн зависит от статического коэффициента сдвиговой вязкости. При высоких частотах затухание отсутствует и спектр частот зависит от высокочастотного сдвигового модуля упругости и скорости альфвеновской волны.

Также из решения дисперсионного уравнения относительно комплексного волнового числа получены аналитические выражения для скорости и коэффициента поглощения сдвиговых в магнитной жидкости. Проанализированы их предельные значения при низких и высоких частотах. Показано, что при низких частотах поглощение на длине волны равно большому значению и сдвиговые волны быстро затухают. При высоких частотах сдвиговый модуль упругости стремится к предельному высокочастотному значению, следовательно, поглощение на длине волны мало и сдвиговая волна может распространяться в магнитной жидкости.

В дальнейшем показано, что при изменении геометрии задач линеаризованные уравнения движения и намагниченности можно привести в виде двух систем независимых уравнений, одна из которых описывает модифицированную сдвиговую волну, а другая – быструю, медленную магнитозвуковые волны и волны альфвеновского типа в магнитной жидкости. При дальнейшем решении уравнений получены аналитические выражения для скорости распространения и коэффициента поглощения быстрых магнитозвуковых волн в магнитных жидкостях.

Проведены численные расчеты зависимости скорости и коэффициента поглощения сдвиговых и продольных звуковых волн в магнитных жидкостях от частоты, концентрации, температуры и внешнего магнитного поля. Также рассмотрена анизотропия скорости и коэффициента поглощения звука в магнитных жидкостях. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с существующими литературными данными об акустических свойствах магнитных жидкостей.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, что подтверждается публикациями в высокорейтинговых журналах и докладами на профильных конференциях. Также хотелось бы отметить основные **достоинства** работы Зарифзода А.К. Автором предложен оригинальный комплексный теоретический подход к описанию динамического поведения магнитных жидкостей. Данная теория применена к различным процессам: диффузии, сдвиговым и объемным течениям, распространению акустических волн. Полученные результаты обладают **новизной**, являются **достоверными**, дополняют известные теоретические модели и согласуются с данными экспериментов.

Давая общую положительную оценку, необходимо сделать ряд **замечаний**:

1. Из текста диссертации неясно, что автор подразумевает под диаметром частица: гидродинамический диаметр, включающий ПАВ, диаметр твердой частицы, включающий немагнитный слой, или магнитного ядра.
2. Одним из видов исследуемых возмущений в работе являются альфвеновские волны, возникновение которых в магнитных жидкостях вызывает вопросы из-за отсутствия ионов в рассматриваемой среде.
3. Как в рассматриваемой модели учитывается влияние поверхностно-активного вещества, как закреплённого на поверхности магнитных наночастиц, так и свободно плавающего в жидкости-носителе.
4. В главе 3 обсуждаются релаксационные процессы до частот 10^{13} - 10^{15} Гц. Известны работы U. Kaatze на чистых жидкостях, предельные частоты в которых составляют 10 ГГц. Реализация экспериментов при более высоких частотах для коллоидных магнитных систем не представляется физически обоснованной.
5. В разделе 5.2. автором рассматривается распространение магнитозвуковых волн в магнитной жидкости. Термин «магнитозвуковые волны» не является общепринятым.
6. В тематике диссертации заявлена теория релаксационных процессов, однако в большинстве выражений рассматривается ситуация с замороженной намагниченностью.
7. При расчете численных расчетов коэффициентов вязкости и соответствующих модулей упругости магнитных жидкостей (рис.3 диссертации и рис. 1 автореферата) не указано значение концентрации твердой фазы.
8. В тексте диссертации для обозначения различных величин используются одинаковые обозначения. Так, например, σ в формуле (1.12) обозначено напряжение сдвига, а в (2.14) – диаметр частицы.
9. В тексте диссертации, например, в табл.1, не всегда приведена расшифровка величин.
10. Текст диссертации написан хорошим научным языком, каждая глава начинается с развернутого обоснования и отсылки к уже полученным результатам, однако, в конце содержательных глав отсутствует общепринятый параграф с выводами.
11. Также к оформлению диссертации можно высказать замечания о том, что автором в опубликованных статьях получен большой объем теоретических данных, характеризующих релаксационные процессы, динамику физических свойств магнитных жидкостей, однако в тексте диссертационной работы

многие результаты рассмотрены в сжатом формате, что сказалось на полноте изложения и объеме диссертации.

12. В автореферате также имеется несколько неточностей. Так указано «на рис.7 и 10», правильно «на рис. 7-10». На рис. 7, 8 не подписаны кривые, хотя в диссертации рис. 17б, рис.19б, соответственно, приведены необходимые комментарии.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не умаляют значимости основных результатов диссертации. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, обладающей актуальностью, научной новизной и высокой теоретической и практической значимостью. Результаты, полученные автором, имеют важное значение для теории явлений переноса, описания упругих и акустических свойств магнитных жидкостей. Результаты диссертации могут быть использованы для оптимизации технологических процессов и представляют интерес для научных организаций, связанных с исследованием физико-химических свойств магнитных жидкостей.

Содержание диссертационной работы соответствует специальности. Автореферат диссертации полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы и соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Зарифзода Афзалшох Кахрамона «Молекулярная теория релаксационных процессов, динамических вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей» полностью удовлетворяет требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-западный государственный университет

научная специальность: 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

Ряполов Петр Алексеевич

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Телефон: +7 (4712) 22-25-53, e-mail: ryapolovpa@swsu.ru.

Подпись П.А. Ряполова заверяю:



Ряполова П.А.
Достоверно
Специалист по кадрам