ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию 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

Актуальность темы. Магнитные жидкости (феррожидкости, ферроколлоиды) представляют собой коллоидные растворы с наноразмерными частицами ферро- или ферримагнетиков в обычных жидкостях, обладающие высокой чувствительностью к внешним магнитным полям. Обычно их магнитная восприимчивость имеет порядок нескольких единиц СИ, но при высокой концентрации магнитной фазы и низкой температуре может достигать сотни единиц – это на четыре – шесть порядков больше, чем восприимчивость типичных диа- или парамагнитных жидкостей. Высокая чувствительность феррожидкости к внешнему полю и наличие вращательных степеней свободы коллоидных частиц приводят к сильной зависимости тензора напряжений и объемной пондеромоторной силы от напряженности магнитного поля, намагниченности жидкости и времени релаксации магнитных моментов частиц. Как результат, наблюдаются новые физические явления, отсутствующие в обычной жидкости. Речь идет о зависимости гидростатического давления от напряженности магнитного поля, о магнитном скачке давления на границе феррожидкости, о левитации магнитных и немагнитных тел, об анизотропном увеличении вязкости коллоидного раствора в постоянном магнитном поле и ее уменьшении в переменном поле подходящей частоты вплоть до смены знака, о ротационном эффекте – вихревом течении феррожидкости во вращающемся поле, связанном с тангенциальными магнитными напряжениями на ее границах и объемными силами, возникающими из-за пространственной неоднородности жидкости и конечного времени релаксации намагниченности и др. Диссертация Зарифзода Афзалшоха Кахрамона является логическим продолжением исследований в области реологии и акустики магнитных жидкостей, проводимых различными группами исследователей, начиная с середины прошлого века. Текучесть магнитных жидкостей является важнейшим свойством, отличающих их от прочих магнитных материалов и определяющим область их применения (герметизация вращающихся валов, демпферы, громкоговорители и клаксоны, датчики наклона, теплоносители в охлаждающих устройствах и пр.). В рецензируемой диссертации на основе методов статистической теории неравновесных процессов проведено исследование акустики и процессов переноса в магнитных жидкостях с учетом трансляционных и структурных компонент, межчастичных магнитодипольных взаимодействий и внешнего магнитного поля в широком диапазоне изменения физических параметров системы. Основное внимание диссертанта сосредоточено на малоизученных высокочастотных процессах. Тема диссертации, таким образом, безусловно является актуальной.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержит 225 страниц текста, включая 47 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 330 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, цели и задачи диссертационной работы, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту и приведена краткая аннотация глав диссертации.

В первой главе приводятся основные сведения о нанодисперсных системах, включая магнитные жидкости, подробно анализируются теоретические и экспериментальные работы по реологии и акустике магнитных жидкостей, перечисляются преимущества и недостатки существующих теории и моделей, описывающих физические свойства магнитных жидкостей. Обосновывается необходимость применения статистической теории в исследовании динамических вязкоупругих свойств магнитных жидкостей во внешнем поле.

Вторая глава посвящена статистической теории двухкомпонентной магнитной жидкости. Используется система кинетических уравнений для одночастичной и двухчастичной функций распределения частиц магнитной жидкости и суперпозиционное приближение Кирквуда для трехчастичной функции распределения. Гидродинамические параметры магнитной жидкости определяются через импульсные моменты статистических функций распределения, записываются уравнения обобщенной гидродинамики для законов сохранения массы, импульса и энергии. В уравнениях содержится тензор напряжения магнитной жидкости, определяя который, можно исследовать ее вязкоупругие свойства. В этой же главе обобщается уравнение Смолуховского для функции неравновесной бинарной плотности частиц магнитной жидкости и приводится его общее решение. В дальнейшем это уравнение позволяет описать структурные релаксационные процессы, происходящие в магнитных жидкостях.

Третья глава посвящена исследованию релаксационных процессов и вязкоупругих свойств диэлектрических магнитных жидкостей. Определяется микроскопическое выражение тензора напряжения и аналитические выражения для динамических коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, а также объемного и сдвигового модулей упругости. Показано, что релаксация сдвиговой вязкости и сдвигового модуля упругости содержит как трансляционной, так и структурные компоненты, в то время как релаксация объемной вязкости и объемного модуля упругости является только структурной. Исследованы пределы низких и высоких частот. Показано, что в этих случаях асимптотическое поведение коэффициентов вязкости и модулей упругости согласуется с результатами других теорий. Утверждается, что релаксационные процессы, протекающие в магнитных жидкостях, изменяются по степенному закону, а не по экспоненциальному. Автором проведены численные расчеты частотной зависимости коэффициентов вязкости

и модулей упругости в магнитных жидкостях на основе воды, керосина, ундекана и додекана. Показано, что широкая частотная дисперсия коэффициентов вязкости и модулей упругости является следствием структурных релаксационных процессов. Приведены результаты численных расчетов коэффициентов вязкости и модулей упругости магнитных жидкостей в зависимости от концентрации феррочастиц, температуры и напряженности внешнего магнитного поля. Сравнение расчетных данных с эмпирическими моделями и экспериментальными результатами показало, что полученные автором аналитические выражения для коэффициентов вязкости и модулей упругости вполне удовлетворительно описывают реологические свойства магнитных жидкостей в широком диапазоне концентраций магнитных частиц и напряженностей внешнего магнитного поля.

В четвертой главе диссертации исследованы вязкоупругие свойства электропроводных магнитных жидкостей: обоснован выбор модели, приведены кинетические уравнения для функций распределения частиц и выведены уравнения обобщенной гидродинамики. На основе тензора напряжения электропроводной магнитной жидкости, получены аналитические выражения для коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, а также объемного и сдвигового модулей упругости. Проведен асимптотический анализ полученных выражений при низких и высоких частотах. Показано, что асимптотическое поведение коэффициентов вязкости и модулей упругости в электропроводных магнитных жидкостях аналогично их поведению в диэлектрических жидкостях. Определены коэффициенты вязкости и модули упругости, их зависимости от частоты, термодинамических параметров системы и внешнего магнитного поля. Сделано заключение о том, что в электропроводных магнитных жидкостях частотная дисперсия коэффициентов вязкости начинается при меньших значениях частот нежели в диэлектрических жидкостях. Рассчитанная автором концентрационная зависимость коэффициента вязкости электропроводной магнитной жидкости демонстрирует ее удовлетворительное согласие с литературными данными.

В пятой главе исследованы процессы распространения и поглощения сдвиговых и звуковых волн в магнитных жидкостях. Из уравнений движения магнитной жидкости и эволюции намагниченности получено дисперсионное соотношение, описывающее процессы распространения и поглощения сдвиговых волн в магнитных жидкостях, определен спектр частот. Рассмотрено асимптотическое поведение спектра частот и затухания волн в предельных случаях низких и высоких частот. Показано, что в высокочастотном пределе затухание отсутствует и спектр частот зависит от высокочастотного сдвигового модуля упругости. Из решения дисперсионного уравнения относительно волнового числа определены скорость и коэффициент поглощения сдвиговых волн. Исследована акустическая дисперсия в магнитных жидкостях. Проведены численные расчеты зависимости скорости и коэффициента поглощения акустических волн от термодинамических параметров системы и величины внешнего магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Новизна, научная и практическая значимость результатов

Отличительной особенностью диссертации Зарифзода А.К. является кинетический подход к описанию процессов переноса, упругих и акустических свойств магнитных жидкостей. Используя обобщенные кинетические уравнения для одночастичных и двухчастичных функций распределения и приближение Кирквуда для трехчастичной функции распределения, он получил аналитические выражения для динамических коэффициентов объемной и сдвиговой вязкости, а также объемного и сдвигового модулей упругости магнитных жидкостей. Исследованы процессы распространения и поглощения акустических волн в магнитных жидкостях. Получена важная информация о коэффициентах переноса, модулях упругости и акустических параметрах магнитных жидкостей в зависимости от термодинамических параметров системы. Наиболее значимыми результатами диссертации считаю частотные зависимости коэффициентов вязкости и модулей упругости магнитных жидкостей и результаты, касающиеся процессов переноса в электропроводных феррожидкостях. Автором показано, в частности, что в высокочастотном режиме наряду с объемным модулем, в магнитных жидкостях появляется также сдвиговый модуль упругости, который обеспечивает возможность распространения продольных и поперечных акустических волн. Решение поставленных в диссертации задач позволило систематизировать представления о релаксационных процессах в магнитных жидкостях и оценить роль структурной релаксации. Найденные выражения для коэффициентов вязкости, модулей упругости и акустических параметров могут быть использованы для обработки экспериментальных данных по вязкоупругим и акустическим свойствам магнитных жидкостей.

Анализ диссертационной работы показывает, что содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. **Выдвигаемые соискателем положения, а также сформированные выводы достоверны**, что подтверждается корректной постановкой задач, выбором математически обоснованных методов решения, качественным и количественным соответствием полученных результатов с известными экспериментальными данными, полуэмпирическими моделями и аналитическими формулами для некоторых предельных ситуаций.

Вопросы и замечания по диссертации

1. На стр. 39 диссертации автор пишет: «Согласно данных этих работ ([81-83]) под действием внешнего поля вязкость (магнитных жидкостей) может увеличиваться от нескольких десятков до сотен раз». Я считаю это утверждение неточным, так как оно касается только весьма специфических систем. Сильный магнитовязкий эффект наблюдается, в частности, в термодинамически неустойчивых коллоидах, склонных к расслоению в магнитном поле на слабо- и сильно концентрированные фазы с

образованием вытянутых вдоль поля капельных агрегатов. Эти коллоидные растворы, как правило, не пригодны для технического применения из-за своей нестабильности. Кроме того, сильный эффект (вплоть до появления предела текучести) характерен для магнитореологических суспензий, которые, однако, качественно отличаются от магнитных жидкостей. Размер частиц в суспензиях имеет порядок нескольких микрон и более и эти частицы не участвуют в тепловом движении.

2. В тексте диссертации я не нашел прямых ограничений на реологию дисперсионной среды, в то время как численные расчеты вязкости и модулей упругости магнитных жидкостей проведены для ньютоновских жидкостей-носителей (вода, керосин, додекан, ундекан). Означает ли это, что свойства магнитной жидкости, приготовленной, например, на основе вязко-упругого носителя, находятся за границей применимости общего подхода автора?

3. В третьей главе диссертации утверждается, что релаксационные процессы, протекающие в магнитных жидкостях, изменяются по степенному закону, а не по экспоненциальному. Это утверждение очевидно не может распространяться на разбавленные растворы, в которых реология определяется в основном свойствами дисперсионной среды, а относительный вклад магнитных частиц и межчастичных взаимодействий невелик.

4. Полагаю, что в диссертации слабо отражена проблема двух физически разных механизмов переориентации магнитных моментов частиц: броуновского и неелевского. В первом случае магнитный момент частицы «вморожен» в тело частицы и вращается вместе с ним. Включение внешнего магнитного поля приводит к частичной блокировке вращательных степеней свободы частиц и анизотропному увеличению вязкости. Во втором случае тело частицы и ее магнитный момент флуктуируют независимо и включение магнитного поля не влияет существенно на эффективную вязкость. Принадлежность частицы к «броуновскому» или «неелевскому» типу определяется энергией магнитной анизотропии. В магнетитовых коллоидах обычно преобладают «неелевские» частицы с диаметром магнитного ядра до 16-18 нм, поэтому рассчитывать можно только на довольно слабую полевую зависимость вязкости. Как можно понять из контекста диссертации, в ней априори рассматриваются магнитожесткие частицы с броуновским механизмом релаксации магнитных моментов. Если это так, то результаты по полевой зависимости коэффициентов вязкости и модулей упругости могут быть применены только к жидкостям с наночастицами из кобальта с большой энергией магнитной анизотропии или подобных материалов.

5. Экспериментальные данные по магнитовязкому эффекту в магнитных жидкостях можно найти в монографии Э.Я. Блума и др. (Магнитные жидкости, Рига, «Зинатне», 1989). Было бы интересно сравнить эти данные с результатами расчета в рамках предлагаемой в диссертации модели и поискать причины возможных расхождений.

Заключение

Сделанные замечания не являются критическими и направлены, в основном, на стимулирование дальнейших исследований автора. Диссертация Зарифзода А.К. в целом оставляет хорошее впечатление. Она является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научных рецензируемых изданиях, включая тринадцать статей в изданиях из списка ВАК, тема диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Таким образом, диссертация Зарифзода Афзалшоха Кахрамона «Молекулярная теория релаксационных процессов, динамических вязкоупругих и акустических свойств магнитных жидкостей» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физических свойств и реологии магнитных жидкостей, она отвечает критериям, установленным пунктами 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации за № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 26.09.2022), а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН), д.ф.-м.н., профессор
Пшеничников Александр Федорович

Адрес: 614013, Российская федерация, г. Пермь, ул. Ак. Королева, 1.
E-mail: pshenichnikov@icmm.ru
Тел.: +7(342)2378325

Личную подпись А.Ф. Пшеничникова заверяю,
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН

Н.А. Юрлова