

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Шельдешовой Елены Владимировны**

**«Динамика и свойства магнитной жидкости при механических, температурных и магнитных воздействиях»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. - Физика конденсированного состояния

Магнитные жидкости являются, возможно, первым искусственно синтезированным активным наноматериалом. Несмотря на многолетнюю историю исследований, они и в настоящее время – востребованный предмет изучения, так как являются основой для многих перспективных полезных устройств и технологий. Актуальность сохраняют как уже сложившиеся направления: уплотнения, клапаны, системы поддержки опорных подшипников, демпфирование акустических излучателей и др., так и новые микротехнологические и биомедицинские приложения: микрофлюидика, адресная доставка лекарств, гипертермия и др.

В этих системах магнитная жидкость должна течь по узким, часто извилистым, каналам. Поэтому прогнозирование реологии этой многокомпонентной среды и управление её механикой посредством магнитных полей является единой и важной задачей. Исследование некоторых её аспектов и составляет содержание диссертации Е.В. Шельдешовой. В частности, интерес представляют возможности качественной диагностики свойств магнитных жидкостей и их поведения в каналах в контакте с газовыми включениями. Решение этих вопросов необходимо для того, чтобы продвигать практические применения магнитных жидкостей и их внедрение в инновационные инженерные разработки. В этом отношении актуальность темы и результатов диссертации не вызывают сомнений.

Диссертационная работа содержит 181 страницу текста, что включает 75 рисунков и 11 таблиц. Она состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения и списка литературы на 326 наименований.

Первая глава диссертации – обзорная. Представлен анализ экспериментальных и теоретических работ по структуре и свойствам магнитожидкостных систем, исследованию вязкости магнитной жидкости. По итогам обзора отмечен ряд неизученных и не до конца разработанных аспектов исследования взаимосвязи физических свойств и внутренней структуры магнитных жидкостей (моно- и бидисперсных) под воздействием магнитных

полей, механического возбуждения и изменений температуры. Отмечено, в частности, что неоднородность микроструктуры и вызванная ею неоднородность макроскопических свойств (например, вязкости) становится существенным фактором в условиях значительных пространственных ограничений, как это происходит в микрофлюидике. Выводы обзора доказывают обоснованность выбора темы диссертации.

Во второй главе описаны объекты исследований. Ими являлись магнитные жидкости, где в качестве твёрдой фазы всегда выступал магнетит, в качестве стабилизатора – олеиновая кислота, а жидкая дисперсионная среда варьировалась: керосин, минеральное масло, полиэтилсилоксан. Также в рассмотрение были включены образцы, где жидкостью-носителем служила вода, а стабилизация была двухслойной: олеиновая кислота и олеат натрия. Базовых жидкостей было шесть, из них разбавлением было получено и изучено в общей сложности 18 образцов.

В этой же главе представлены основные экспериментальные методики, использованные в работе.

В третьей главе описаны измерительные установки, созданные для исследования динамики магнитной жидкости в цилиндрической оболочке в условиях магнитных, температурных и механических воздействий. Определены оптимальные условия экспериментов. Также разработана и использована установка по исследованию динамики колебаний капли магнитной жидкости в поле кольцевого постоянного магнита, надетого на трубку так, что жидкость играет либо роль пробки, перекрывающей канал с газом, либо запирающей порцию газа в отрезке трубки.

В четвертой – результативной – главе предложены два варианта метода определения вязкости магнитной жидкости. Они оба используют запись сигнала динамической намагниченности, сопровождающего переходный процесс – затухание осцилляций порции (столба) магнитной жидкости, заключённой в трубке. Эта порция удерживается в трубке за счёт приложенного извне градиентного магнитного поля. Колебание возбуждается импульсом давления воздуха на один из торцов магнитожидкостного столба. Развёртка получаемого сигнала сходна с той, что даёт демпфированный точечный осциллятор. В первом варианте с помощью цифровой обработки получается частота колебаний цилиндра. Во втором варианте по тому же сигналу находится коэффициент затухания колебаний.

Главный этап – теоретическая обработка полученных результатов с целью извлечь значение эффективной вязкости используемой магнитной жидкости при заданных в эксперименте напряжённости поля и температуре. Два указанных измерения – собственной частоты и коэффициента затухания – с одной стороны, связаны, а с другой стороны,

являются взаимодополняющими. В самом деле, частота колебаний определяется в основном движением центральной части магнитожидкостного цилиндра, в которой сосредоточена основная масса образца. В то же время, затухание обусловлено диссипацией энергии в приповерхностном слое, где сосредоточены максимальные градиенты скорости жидкости. Очевидно, что указанные измерения будут давать близкие значения вязкости только в том случае, когда процессу сопоставлена адекватная теоретическая картина. По большей части, предложенная модель справилась с решением этой задачи: полученные результаты удовлетворительно коррелируют со значениями вязкости, полученными ротационной вискозиметрией.

Чтобы учесть специфику жидкого образца, для интерпретации результатов в схему, описывающую переходный процесс, введён учёт течения жидкости в пристеночных слоях (вязкий пограничный слой). В рамках этого расчёта автору удалось предложить модель, которая аппроксимирует зависимости пристеночной вязкости от температуры и напряжённости магнитного поля в условиях сдвиговых колебаний в образцах магнитной жидкости, отличающихся дисперсионными средами, концентрацией стабилизатора и, в результате этого, микроструктурой.

Результатами экспериментов установлено, что присутствие свободного поверхностно-активного вещества в магнитной жидкости ослабляет зависимость вязкости от магнитного поля. Экспериментами на бидисперсных (крупные и мелкие наночастицы магнетита) магнитных жидкостях показано, что увеличение концентрации крупных частиц приводит к резкому возрастанию магнитовязкого эффекта. Очевидной причиной является усиление межчастичных взаимодействий и обусловленный им рост агрегатов.

В пятой главе описано экспериментальное исследование динамики колебаний магнитной жидкости, ограничивающей газовую полость в вертикальной трубке. Порция жидкости, удерживаемая в канале полем находящегося снаружи кольцевого постоянного магнита, образует «пробку», которую возмущают импульсом давления воздуха. Рассмотрены три варианта отрезка трубки под пробкой. Первые два очевидные: глухая пробка и открытый конец. Интерес автора – к третьему варианту, когда в пробке имеется капилляр с диаметром в диапазоне 0.1–1 мм. При колебании магнитожидкостной пробки в движение воздуха в полости (отрезке трубки) вызывает и возвратно-поступательное течение воздуха по капилляру. Это течение происходит при больших градиентах скорости и, таким образом, капилляр играет роль присоединённого демфера. Очевидно, что слишком тонкие и слишком толстые капилляры неэффективны: эффект от очень тонкого мало отличим от влияния глухой пробки, а слишком толстый приближает ситуацию к случаю открытого

конца трубки. Это означает, что измеряемый коэффициент затухания колебаний пробки имеет максимум при определённом диаметре капилляра. Это эффект – он оказывается достаточно сильным – обнаружен, измерен и объяснён количественно. Обоснована и подтверждена формула для расчёта диаметра капилляра, обеспечивающего максимально демпфирование колебаний магнитожидкостной пробки. Результат проделанной работы можно рассматривать как физическую модель магнитожидкостного амортизатора, обоснованную и теоретически, и экспериментально.

По всем главам работы сформулированы выводы, суммирующие их содержание. Общий итог подведён в Заключении.

Подведём итог в целом. Главное содержание работы – обоснование и демонстрация возможности получать данные о взаимосвязи между физическими свойствами и структурой образца, анализируя динамику конечного объёма магнитной жидкости в условиях различных комбинаций внешних воздействий: магнитных, механических и тепловых. Это сделано на репрезентативной выборке образцов магнитной жидкости (включая бидисперсные системы), отличающихся структурой и макроскопическими свойствами. Полученные результаты полезны для физики конденсированного состояния, для её раздела, изучающего процессы переноса в гетерогенных системах. Проведённые исследования реологических свойств различных магнитных жидкостей имеют и практическую перспективу: они помогут прогнозировать поведение активных элементов из магнитожидкостных сред в различных устройствах.

Все положения и выводы диссертационного исследования соответствуют его цели и поставленным задачам, основаны на представленных результатах, детально описаны и проиллюстрированы. Степень обоснованности научных положений и выводов в рассматриваемой работе не вызывает сомнений. Достоверность данных, подтверждается использованием современных апробированных научных подходов и методов.

Основные научные результаты по теме диссертации представлены в научной печати в 12 публикациях в регулярных научных журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, из них 8 индексируются ведущими мировыми реферативными базами Scopus/WoS. Анализ опубликованных автором работ по теме диссертации позволяет сделать вывод о том, что все основные результаты работы достаточно полно представлены в научной литературе.

В целом, диссертация написана достаточно грамотно и ясно. Подробно описана техническая сторона используемых экспериментальных методов. Автореферат полностью передаёт основное содержание диссертационной работы.

Диссертация даёт поводы для содержательных вопросов. Задам единственный, мне он представляется существенным. Бидисперсные магнитные жидкости конструируются в работе путём добавления к устойчивым магнитным коллоидам крупной фракции: частиц магнетита размером порядка 300 нм. Такие частицы, даже не будучи магнитными должны достаточно быстро оседать в силу разницы в удельных весах феррита и дисперсионной среды. Обладая без поля остаточным магнитным моментом, а в поле – увеличившимся наведённым, они соберут на себя рой мелких наночастиц, что заставит их оседать ещё быстрее. Понятно, что за счёт механической гомогенизации (мешалки, ультразвук) такую взвесь можно создать. Но насколько долго она «живёт», не расслаиваясь? Как соотносится это время жизни с временем проведения измерения?

Ни одна диссертация не обходится и без критических замечаний по поводу текстуальных неточностей и неудачных формулировок. Работа Е.В. Шельдешовой не исключение. Так,

1. На стр.71 читаем: «В сильном поперечном магнитном поле трубка, открытая с обоих концов, заполненная магнитной жидкостью, приобретает форму, близкую к цилиндрической». Хотелось бы понять, что это значит на самом деле.

2. Надписи на рисунках, находящихся на стр. 14, 23, 24, 48, 49, 112, 113, 118, 120, 123, 125 пояснительные надписи и/или обозначения единиц измерения даны на английском языке. Это небольшая погрешность, если бы эти рисунки воспроизводили графику только из собственных работ автора. Однако это не так: как минимум, часть рисунков взята из работ других авторов, процитированных в тексте. Логично было бы повторить эти указания и в подписях к рисункам.

3. Использование сугубо специфических терминов не помогает ясности изложения. Что означает понятие «минимальный полезный объём [видимо, кластера наночастиц]» на стр. 102? Наверняка, можно было изложить мысль в более понятном виде.

4. На странице 131 за формулой (5.3) следует формула номер (4), за которой идёт формула (5.5). Чистая опечатка.

Все указанные выше неточности носят, однако, совершенно частный характер; их упоминание важно, но никак не влияет на общую положительную оценку работы. Таким образом,

□ диссертационная работа Е.В. Шельдешовой является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые научные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной задачи полезной для развития физики конденсированного состояния;

- диссертация соответствует всем требованиям, в том числе п. 9, «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, и соответствует паспорту специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния;
- автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Я, Райхер Юрий Львович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент.

главный научный сотрудник

Лаборатории динамики дисперсных систем

Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук –

филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского

федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

профессор

Ю.Л. Райхер

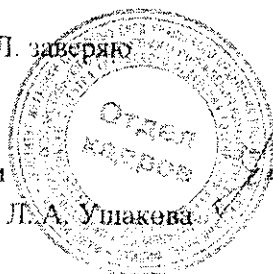
Адрес: 614018, г. Пермь, ул. Королева, 1

Тел.: +7 (342) 237 83 23

e-mail: [raikher@icmm.ru](mailto:raikher@icmm.ru)

Подпись Райхера Ю. Л. заверяю

Специалист по кадрам



Л.А. Ушакова

18.04.2024