

На правах рукописи



Шельдешова Елена Владимировна

**ДИНАМИКА И СВОЙСТВА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ
МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Курск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Ряполов Петр Алексеевич

Официальные оппоненты: **Райхер Юрий Львович**
доктор физико-математических наук, профессор,
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

Ерин Константин Валерьевич
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры экспериментальной физики
физико-технического факультета Федерального
государственного образовательного учреждения
высшего образования «Северо-Кавказский
федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита состоится «23» мая 2024 г. в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.435.01 на базе Юго-Западного государственного
университета по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного
государственного университета по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября,
94, и на сайте <https://www.swsu.ru>.

Автореферат разослан «___» марта 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.435.01, к.ф.-м. н., доцент



Кочура Алексей Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и разработанность темы исследования. Магнитные жидкости (МЖ) являются уникальным активным материалом, сочетающим в себе текучесть и магнитные свойства. Это коллоидный раствор наночастиц магнетика, покрытых поверхностно-активным веществом (ПАВ) и диспергированных в жидкость-носитель. МЖ представляют собой первый искусственно синтезированный наноматериал. Они являются объектом пристального внимания исследователей уже на протяжении 60 лет, и дают широкое научное поле деятельности, как экспериментаторам, так и теоретикам благодаря уникальной взаимосвязи микроструктуры, макроскопических свойств и динамики объемов коллоида при различных комбинациях внешних воздействий. Эти физические взаимосвязи позволили найти данным активным коллоидам широкое применение в различных технических устройствах: амортизаторах, герметизаторах, датчиках и многих других приложениях. Несмотря на значительный период исследований и внедрений МЖ, в последние несколько лет наблюдается экспоненциальный рост числа публикаций и патентов, связанных с активными магнитными системами. Это объясняется, в частности, развитием технологий синтеза коллоидов со специфическими ПАВ, появлением работ по адресной доставке лекарств, развитием микрофлюидных систем. При этом МЖ протекает по узким каналам в условиях пространственного ограничения, и прогнозирование реологии подобных систем является важной задачей. В этих системах, при воздействии магнитных полей возникают пристеночные слои, в которых образуются структуры, оказывающие значительное влияние на динамику процесса течения МЖ. В реальных образцах МЖ образуются и распадаются агрегаты, дисперсный состав чаще неоднородный и содержит различные фракции, оболочка из ПАВ может иметь дефекты, что оказывает значительное влияние на физические свойства и динамику коллоидов при внешних магнитных воздействиях. Эти изменения в значительной степени проявляются в микроканалах, в которых наблюдается диффузионно-ограниченная агрегация (DLA).

Два наиболее популярных способа изучения вязкости – капиллярный и ротационный, не обладают достаточной чувствительностью для обнаружения структурных изменений в коллоидных системах, что делает актуальным исследование динамики МЖ, ограниченной цилиндрической поверхностью, в магнитном поле в условиях сдвиговых колебаний при различных значениях напряженности магнитного поля и температуры. Исследование магнитовязкого эффекта на репрезентативной выборке образцов МЖ с различной структурой и макроскопическими свойствами, включая бидисперсные системы, будет иметь значение для различных разделов физики, в особенности для физики конденсированного состояния. Проведенные исследования реологических свойств магнитных жидкостей и систем на их основе позволят спрогнозировать поведение активных элементов из магнитожидкостных сред в различных устройствах.

Целью диссертационной работы является установление взаимосвязи физических свойств, внутренней структуры, динамики магнитной жидкости и

бидисперсных систем на ее основе в магнитных полях при механических и температурных воздействиях на них в условиях пространственного ограничения.

Задачи исследования:

– разработать термостабилизированную экспериментальную установку, позволяющую исследовать динамику магнитной жидкости, ограниченной цилиндрической поверхностью, в условиях механических воздействий в магнитном поле напряженностью от 150 до 1000 кА/м и диапазоне температур от 5 до 60 °С;

– получить репрезентативную выборку образцов магнитной жидкости на основе керосина, полиэтилсилоксановой жидкости, минерального масла и воды, с одинарным и двойным слоем поверхностно-активного вещества с объемной концентрацией твердой фазы ϕ от 1,4 до 19 %, намагниченностью насыщения M_s от 8,7 до 60 кА/м и вязкостью η от 2,5 до 600 мПа·с для исследования взаимосвязи динамики образца магнитной жидкости с его структурой и свойствами;

– синтезировать стабильные бидисперсные системы на основе магнитных жидкостей и магнетитовых частиц микронного размера ($d_{cp} = 300$ нм), исследовать их физические свойства и структуру;

– измерить зависимость частоты колебаний и коэффициента затухания осциллирующей в магнитном поле магнитной жидкости в цилиндрической оболочке от напряженности магнитного поля и температуры;

– модифицировать расчетную модель динамики магнитной жидкости, ограниченной цилиндрической поверхностью, в условиях механических и магнитных воздействий с учетом коэффициента затухания системы и использования экстраполяции зависимостей физических параметров от напряженности магнитного поля и температуры;

– определить значение вязкости магнитных жидкостей и бидисперсных магнитных сред на их основе для различных значений напряженности магнитного поля и температуры с использованием известных теоретических подходов и расчетной модели;

– разработать экспериментальную установку для исследования упругих колебаний системы «магнитная жидкость – газовая полость» в магнитном поле кольцевого постоянного магнита;

– предложить физическую оценку вклада различных механизмов в динамику колебательной системы на основе магнитной жидкости, ограничивающей газовую полость с капиллярами различного диаметра, в цилиндрической оболочке в поле кольцевого постоянного магнита.

Объектом исследования являются магнитные жидкости и бидисперсные системы на их основе.

Предмет исследования: физические свойства, структура и динамика магнитожидкостных систем в условиях механических и температурных воздействий.

Методология и методы исследования. Основные результаты получены экспериментально с применением известных методов и типовых конструкций лабораторных установок, в которых измерительные ячейки изготавливались автором, а количественные измерения осуществлялись стандартными

приборами: измерителями магнитной индукции, усилителями сигналов, цифровыми осциллографами с возможностью передачи данных в программную среду NI LabView, в которой была разработана программа для обработки электромагнитных и акустических возмущений.

Исследованные образцы МЖ были синтезированы в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск), «Проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики» (ИГЭУ им. В.И. Ленина, г. Иваново). Физические параметры МЖ определялись с помощью стандартных измерительных методик, описанных в научной литературе. Плотность жидкостей измерялась аналитическими весами с пикнометром, вязкость – на термостатированном ротационном вискозиметре Brookfeld, температура – термодатчиком, намагниченность насыщения и магнитная восприимчивость – баллистическим методом. Дисперсный состав МЖ определялся магнитогранулометрическим анализом, структура МЖ – атомно-силовой микроскопией. Теоретическая интерпретация результатов делалась с использованием известных выражений классической и магнитной гидродинамики, электродинамики и термодинамики.

Научная новизна диссертации:

1. Впервые проведено комплексное исследование динамики магнитной жидкости (ϕ от 1,4 и до 19 %, M_s от 8,7 до 60 кА/м и η от 2,5 до 600 мПа·с) и бидисперсных систем на ее основе (с добавлением наночастиц магнетита микронного размера $d_{cp} = 300$ нм с массовой концентрацией от 1 до 10 %) в цилиндрической оболочке в условиях механических и магнитных воздействий при изменении напряженности магнитного поля от 150 до 1000 кА/м и температуры от 5 до 60 °С.

2. Получены новые данные с использованием предложенной расчетной модели о зависимости вязкости магнитных жидкостей и бидисперсных систем на их основе от напряженности магнитного поля и температуры в условиях сдвиговых колебаний магнитного коллоида.

3. Впервые экспериментально и теоретически исследована динамика колебаний магнитной жидкости, ограничивающей газовую полость с капиллярами различного диаметра, в цилиндрической оболочке в поле кольцевого постоянного магнита.

Автор выносит на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования и физическую интерпретацию зависимостей частоты колебаний и коэффициента затухания магнитной жидкости в цилиндрической оболочке в условиях магнитных, температурных и механических воздействий.

2. Значения вязкости магнитных жидкостей и бидисперсных систем на их основе с различными структурными и макроскопическими параметрами в зависимости от напряженности магнитного поля и температуры, полученные на основе предложенной расчетной модели.

3. Особенности динамики системы «магнитная жидкость – газовая полость», ограниченной цилиндрической оболочкой с капиллярами различного диаметра, в магнитном поле кольцевого постоянного магнита.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается путем проведения повторяемых экспериментов и теоретических расчетов, использования стандартного оборудования и приборов для измерений, оценки погрешности измерений, а также применения дополнительных методик для изучения динамики, структуры и свойств магнитожидкостных систем, в том числе и наноаналитического оборудования. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими расчетами, а выводы и результаты работы физически обоснованы и соответствуют известным научным данным.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что в работе на представительной выборке образцов установлены новые взаимосвязи физических свойств, структуры и динамики МЖ и бидисперсных систем на ее основе, находящихся в магнитном поле, при механических и температурных воздействиях на них в условиях пространственного ограничения магнитожидкостной системы. Полученные результаты служат основой для нового метода исследования пристеночной вязкости МЖ в зависимости от напряженности магнитного поля и температуры, позволяющего оценить ее структурирование в тонком пристеночном слое.

Автор диссертационной работы частично применяет результаты своего исследования в образовательном процессе Юго-Западного государственного университета в рамках таких дисциплин, как «Материаловедение (основы, композиционные и наноструктурированные материалы)», «Физико-химические основы микро- и нанотехнологии» и «Нано- и микродисперсные магнитные системы». Эти предметы входят в образовательную программу по направлению подготовки «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях: 3-й Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (2017 г., Курск); XX, XXI, XXII, XXIII Зимней школе по механике сплошных сред (2017, 2019, 2021, 2023 гг., Пермь); II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества (2017 г., Нижний Новгород); 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России» (2017 г., Курск); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (2017 г., Москва); Международной научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований» (2017 г., Самара); Московском международном симпозиуме по магнетизму (MISM) (2017 г., Москва); 18-й, 20-й Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям (2018, 2022 гг., Плес, Ивановская обл.); XV Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы теплофизики и физической гидродинамики» (2018 г., Новосибирск); XIV Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (2019 г., Курск); XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2019 г., Уфа); 7-й Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (2020 г., Курск); 1, 2-й Международной научно-практической конференции «Актуальные

вопросы науки, нанотехнологий, производства» (2021, 2022 гг., Курск); Международной научно-практической конференции «Перспективные материалы науки, технологий и производства» (2022 г., Курск); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы естественных, математических и технических наук в контексте современного образования» (2022 г., Липецк); Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus (2022, 2023 гг., Санкт-Петербург); V International Baltic Conference on Magnetism (2023 г., Калининград); Международной Ставропольской конференции по магнитным коллоидам (2023 г., Ставрополь).

Исследования, описанные в диссертации, были проведены при поддержке: гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук (МК-1393.2019.8); международного гранта РФФИ (проект № 17-52-04025 Бел_мол_a); государственного задания (проекты № 3.1941.2014/К; № 3.2751.2017/ПЧ; № 0851-2020-0035), а также при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

Публикации. Основные результаты, представленные в диссертации, были опубликованы в 34 работах, из которых 12 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора. Разработана методика и создана термостабилизированная экспериментальная установка для исследования динамики магнитной жидкости и бидисперсных систем на ее основе в цилиндрической оболочке при механических, температурных и магнитных воздействиях; получены и исследованы образцы бидисперсных систем; выполнен весь объем экспериментальных исследований; построены зависимости вязкости магнитной жидкости от напряженности магнитного поля и температуры. Положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Соответствие паспорту научной специальности.

Содержание, направленность диссертационной работы и ее основные выводы соответствуют паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния: п. 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности»; п. 4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 181 странице, содержит 75 рисунков, 11 таблиц и 326 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В главе 1 представлен обзор ранее опубликованных работ. Рассмотрены общие сведения о магнитной жидкости. Особое внимание уделено современным методам измерения вязкости, определены границы применимости существующих методик. На основании представленного литературного обзора сделаны выводы и обозначены задачи, требующие своего решения.

В главе 2 дано описание объекта исследований, представлены методики определения физических параметров образцов. Объектом исследований являлась МЖ определенного состава: коллоидный раствор магнетита в среде – керосине, полиэтилсилоксановой жидкости и минеральном масле, стабилизированной олеиновой кислотой. Также были рассмотрены образцы с водой в качестве жидкости-носителя и двойным слоем стабилизации олеиновой кислотой и олеатом натрия. Физические параметры образцов представлены в таблице 1. Исходные образцы МЖ-1, МЖ-3, МЖ-4, МЖ-6 были изготовлены в Ивановском государственном энергетическом университете, МЖ-2 и МЖ-5 в ЮЗГУ. Образцы МЖ-1.1, МЖ-2.1, МЖ-2.2, МЖ-3.1, МЖ-3.2, МЖ-4.1, МЖ-4.2, МЖ-6.1 и МЖ-6.2 были получены разбавлением исходных образцов соответствующей жидкостью-носителем.

Плотность МЖ определялась методом пикнометра, вязкость измерялась ротационным вискозиметром, намагниченность измерялась баллистическим методом. Исследуемые образцы МЖ: плотность ρ от 897 до 1585 кг/м³, объемная концентрация твердой фазы φ от 1,4 до 19 %, вязкость η от 2,5 до 600 мПа·с, намагниченность насыщения M_s от 8,7 до 60 кА/м, и бидисперсные системы на основе МЖ с добавлением частиц магнетита с размером $d_{cp} = 300$ нм с массовой долей от 1 до 10 %. Образцы представляют собой репрезентативную выборку для исследования взаимосвязи динамики МЖ и бидисперсных систем на ее основе с их структурой и свойствами.

Исследуемые образцы МЖ: плотность ρ от 897 до 1585 кг/м³, объемная концентрация твердой фазы φ от 1,4 до 19 %, вязкость η от 2,5 до 600 мПа·с, намагниченность насыщения M_s от 8,7 до 60 кА/м, и бидисперсные системы на основе МЖ с добавлением частиц магнетита с размером $d_{cp} = 300$ нм с массовой долей от 1 до 10 %. Образцы представляют собой репрезентативную выборку для исследования взаимосвязи динамики МЖ и бидисперсных систем на ее основе с их структурой и свойствами.

В главе 3 дано описание созданных экспериментальных установок для исследования динамики МЖ в цилиндрической оболочке в условиях магнитных,

Таблица 1 – Физические параметры исследованных образцов

Образец	Жидкость-носитель	ρ , кг/м ³	φ , %	M_s , кА/м	η , мПа·с	
МЖ-1	Керосин	1245	11,02	43,3	31,8	
МЖ-1.1		1058	6,62	20,7	4,15	
МЖ-2		1585	19,11	60,4	19,25	
МЖ-2.1		1245	11,06	33	4,05	
МЖ-2.2		985	4,9	14,7	2,45	
МЖ-3		1382	14,2	49,4	180	
МЖ-3.1		1080	7,04	23,6	6,3	
МЖ-3.1.1		1087	7,22	24,4	5,7	
МЖ-3.1.2		1089	7,25	27,4	5,95	
МЖ-3.1.3		1091	7,29	31,2	5,5	
МЖ-3.2		943	3,5	13,5	2,7	
МЖ-4		ПЭС	1323	10,82	39,6	119,97
МЖ-4.1			1074	4,78	17	9,45
МЖ-4.2	981		2,52	10,03	4,75	
МЖ-5	Вода	1212	5,38	21,7	5,6	
МЖ-6	Минеральное масло	1270	10,31	39,90	594	
МЖ-6.1		1018	4,60	17,05	69	
МЖ-6.2		897	1,35	8,70	39,6	

температурных и механических воздействий. Определены оптимальные условия экспериментов.

Схематическое изображение термостабилизированной экспериментальной установки, позволяющей исследовать динамику МЖ, ограниченной цилиндрической поверхностью, в условиях механических воздействий в магнитном поле напряженностью 150–1000 кА/м и диапазоне температур 5–60 °С представлено на рисунке 1.

Лабораторный электромагнит ФЛ-1 с диаметром полюсных наконечников 100 мм использовали в качестве источника магнитного поля.

Между полюсами расположена прозрачная трубка 1 из оргстекла с внутренним диаметром $d = 12$ мм. Трубка была заполнена образцом МЖ 2 и помещена между полюсами электромагнита ФЛ-1; заполнение производилось при напряженности магнитного поля 100 кА/м так, чтобы образец удерживался магнитным полем, препятствующим его вытеканию. Свободные колебания возбуждали путем удаления заглушки 3. Между трубкой и магнитом ФЛ-1 расположена измерительная индукционная катушка 4, состоящая из 5000 витков медного провода диаметром 0,071 мм. Эта катушка помещена в зазоре на уровне свободной поверхности объема МЖ. Сигнал, который генерировался в катушке, сначала усиливался с помощью усилителя 5 (Selective Nanovoltmeter type 237), а затем подавался на осциллограф 6 (GwInstek GOS-72074). Полученные цифровые осциллограммы передавались на компьютер 7 и обрабатывались с помощью программного обеспечения NI LabView с написанным кодом.

Возможность получения температурно-зависимых результатов обеспечивалась системой термостатирования, где герметичный жидкостный контур расположен вокруг измерительной ячейки и соединен с термостатом 8 (КРИО-ВТ-12-1) системой силиконовых гибких трубок. В измерительной ячейке с помощью термостата устанавливали необходимую температуру, а залитую в ячейку МЖ выдерживали в течение 10–20 минут для стабилизации системы. Температуру внутри системы контролировали при помощи цифрового измерителя температуры, который помещался в МЖ. Дополнительно был проведен эксперимент для контроля отсутствия изгибных колебаний при смещении объема МЖ из положения равновесия. С помощью лазерного дальномера – 9, осуществляли сканирование колебаний различных точек торцевой поверхности магнитожидкостного цилиндра. Было установлено, что они все колеблются в одинаковой фазе.

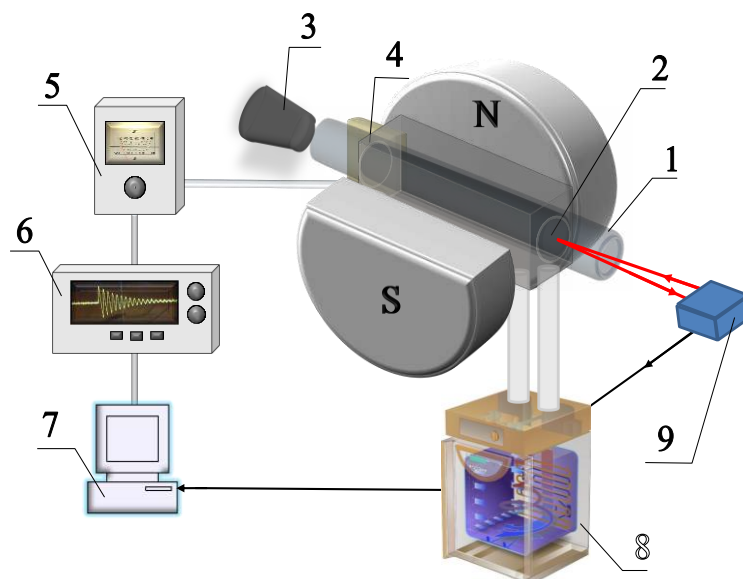


Рисунок 1 – Схема термостабилизированной экспериментальной установки

Схематическое изображение экспериментальной установки для исследования упругих колебаний системы «магнитная жидкость – газовая полость» в магнитном поле кольцевого постоянного магнита представлено на рисунке 2. Порция МЖ 1 объемом $1,5 \text{ см}^3$, внесенная при помощи медицинского шприца в трубку из оргстекла 2 в область максимального магнитного поля кольцевого магнита 3, перекрывает сечение трубки диаметром 12 мм. В исследовании использовали неодимовый кольцевой магнит (сплав NdFeB) размером $60 \times 24 \times 10 \text{ мм}$. Напряженность магнитного поля в центре магнита составляет 220 кА/м .

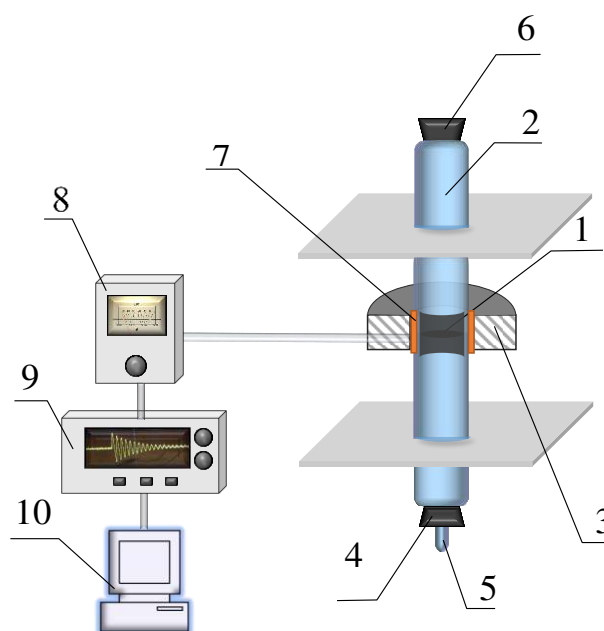


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для исследования упругих колебаний системы «магнитная жидкость – газовая полость»

В процессе измерений реализовали три варианта функционирования установки: 1-й вариант, когда объем МЖ изолирует воздушную полость, образованную вставленной снизу пробкой (опыт «с дном»); 2-й вариант, при котором в дно трубки вставлена пробка с капилляром; 3-й вариант использует объем МЖ, подвешенный за счет магнитной левитации (опыт «без дна»). Таким образом, нижнее основание трубки либо остается открытым, либо закрывается пробкой 4 с капилляром 5 или без него.

Между нижней свободной поверхностью МЖ и пробкой образуется объем воздуха, степень изолированности которого находится в зависимости от линейных размеров капилляра и оказывается максимальна при его перекрытии. Высоту изолированной полости в трубке устанавливали на трех фиксированных уровнях h_0 : 20 мм, 30 мм и 40 мм.

Для возбуждения колебаний использовали резиновую пробку с отверстием 6, которая вставлена в верхний торец трубки. Между пробкой и свободной поверхностью жидкости находится воздушная полость. Удаление пробки с закрытым отверстием из трубки вызывает скачок давления в газовой полости. Во время измерений разрыв объема МЖ не допускается.

Для индикации осциллограмм затухающих колебаний использовали катушку индуктивности 7, а также усилитель 8 (GVT-427B) и цифровой осциллограф 9 (GwInstek GDS-72072). Полученные цифровые осциллограммы передавали на компьютер 10 и обрабатывали с помощью программного обеспечения NI LabView. Индукционная катушка содержит 1900 витков, выполненных медным проводом диаметром 0,071 мм, на каркасе из оргстекла. Каркас жестко вставлен в отверстие кольцевого магнита, но между ним и поверхностью трубки имеется узкий зазор, который позволяет перемещать магнит и объем МЖ для установки их нужного положения.

В главе 4 приведено теоретическое описание динамики МЖ в цилиндрической оболочке при механических, температурных и магнитных воздействиях. Расчётная схема представлена на рисунке 3. Цилиндрическая оболочка (1) заполнена магнитной жидкостью (2). Предполагается, что свободные поверхности объема МЖ (3) находятся на участках с линейным уменьшением напряженности магнитного поля. Магнитное поле в точках свободной поверхности МЖ ориентировано по касательной, то есть имеет только тангенциальную составляющую H_x , и градиент напряженности магнитного поля ориентирован перпендикулярно поверхности в направлении оси OZ . Под действием разницы давлений на основания объема МЖ с поперечным сечением S и длиной b , происходит небольшое смещение (4) центра масс на δz . Это вызывает увеличение объема жидкости в точке с координатой $z = b/2$ на величину $S \cdot \delta z$ и уменьшение ее объема на ту же величину в точке $z = -b/2$.

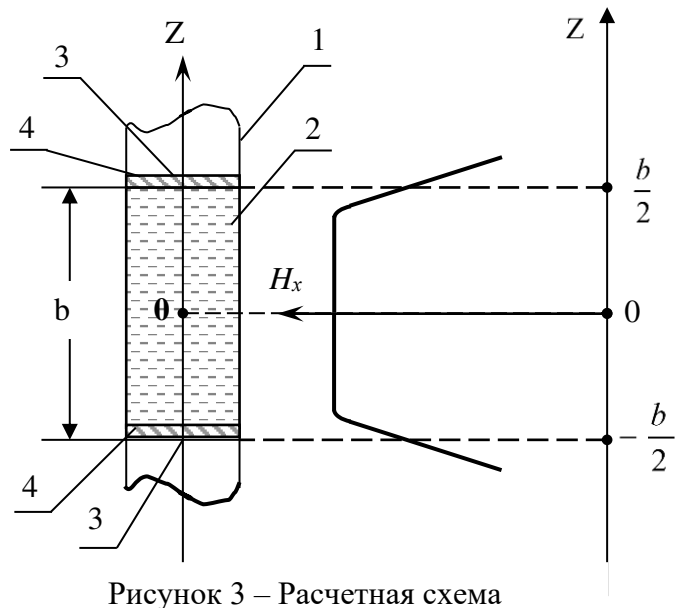


Рисунок 3 – Расчётная схема

Для данной системы с учетом добавки на вязкое трение [1] получено выражение для оценки упругости системы:

$$\pi^3 v^2 \rho b d^2 + 2bd \sqrt{\pi^5 v^3 \eta_H \rho} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{2} \left(M_x \frac{\partial H_x}{\partial z} \right)_{z=b/2}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, M_x – намагниченность поля, $\partial H_x / \partial z$ – градиент нормальной проекции напряженности поля, d – внутренний диаметр трубки, b – длина цилиндрического объема МЖ, ρ – плотность МЖ, η_H – вязкость МЖ, v – частота колебаний объема МЖ.

Из данной формулы получаем:

$$\eta_H = \frac{1}{v^3} \left[\frac{\mu_0 d \cdot M_x}{4b\pi\sqrt{\pi\rho}} \cdot (\partial H_x / \partial z)_{z=b/2} - \frac{\sqrt{\pi\rho} \cdot d \cdot v^2}{2} \right]^2. \quad (2)$$

Это выражение позволяет рассчитать вязкость МЖ в пристеночном слое в случае сдвиговых колебаний ее объема во внешнем магнитном поле. Уменьшаемое в скобках определяется пондеромоторной упругостью системы, вычитаемое зависит от характера колебаний системы.

Запишем уравнение (2) в виде:

$$\eta_H = 1/v^3 [B - C]^2, \quad (3)$$

где параметр $B = (\mu_0 d \cdot M_x / 4b\pi\sqrt{\pi\rho}) \cdot (\partial H_x / \partial z)_{z=b/2}$ характеризует магнитную составляющую системы, а $C = \sqrt{\pi\rho} \cdot d \cdot v^2 / 2$ – упругую. Разница между этими

параметрами накладывает значимые ограничения на точность вычисления вязкости, поэтому при получении зависимости вязкости от магнитного поля используются аппроксимационные уравнения прямых.

Еще одной важной характеристикой данных систем является зависимость их вязкости от температуры. В процессе эксперимента в измерительной ячейке устанавливали необходимую температуру, и затем измеряли частоту и коэффициент затухания сдвиговых колебаний левитирующего объема МЖ при изменении напряженности магнитного поля.

Приведены данные экспериментального исследования влияния физических свойств и структуры МЖ на динамические характеристики объема МЖ в цилиндрической оболочке в зависимости от напряженности магнитного поля. Экспериментально получены зависимости частоты колебаний и коэффициента затухания от напряженности магнитного поля для образцов МЖ-1, МЖ-1.1, МЖ-2.1 и МЖ-2.2. Физические параметры образцов представлены в таблице 1. На рисунке 4 показаны зависимости коэффициента затухания сдвиговых колебаний от напряженности магнитного поля для образцов МЖ-1, МЖ-1.1, МЖ-2.1 и МЖ-2.2.

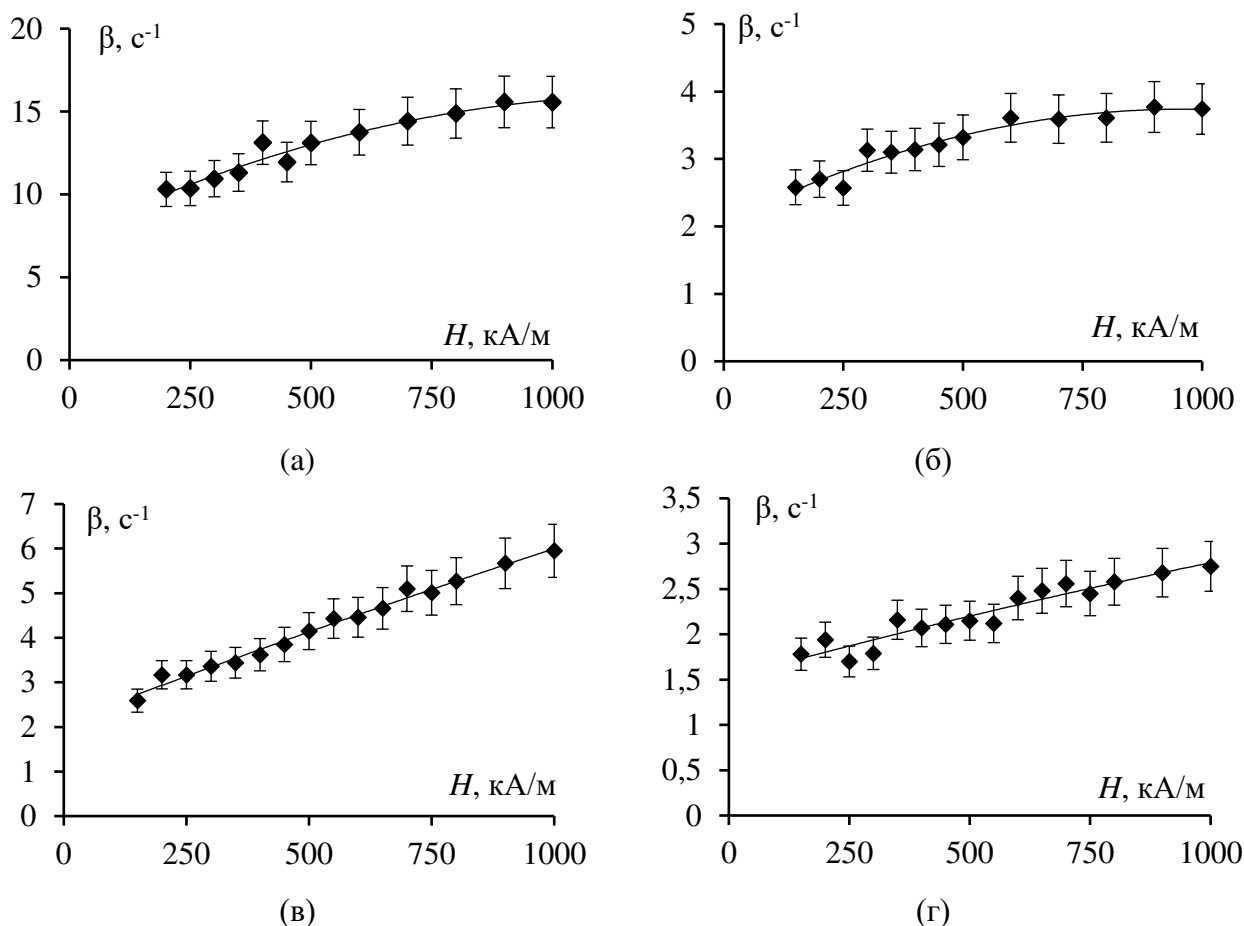


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента затухания сдвиговых колебаний от напряженности магнитного поля: а) МЖ-1, б) МЖ-1.1, в) МЖ-2.1, г) МЖ-2.2

Установлено, что в высококонцентрированных образцах МЖ-1, МЖ-2.1 наблюдается увеличение коэффициента затухания сдвиговых колебаний в 1,5 и 1,9 раз соответственно. Тогда как для разбавленных образцов МЖ-1.1 и МЖ-2.2 эти параметры в магнитном поле увеличиваются в 1,39 и 1,4 раза соответственно, что может быть связано с образованием цепочек и агрегатов в

концентрированном образце. На основе формулы (3) были получены параметры B и C , найдены уравнения аппроксимационных линий, по которым были построены зависимости вязкости для образцов МЖ-1, МЖ-1.1, МЖ-2.1, показанные на рисунке 5. Инструментальная погрешность определения вязкости на основе предложенного подхода составляет 10 %.

Образец МЖ-1 имеет наибольшую намагниченность насыщения ($M_s = 43,3$ кА/м), наибольшую концентрацию магнитной фазы ($\varphi_{\text{маг}} = 9,1$ %) и наименьшую концентрацию ПАВ ($\varphi_{\text{ПАВ}^+} = 1,9$ %). Образец МЖ-1.1 получен разбавлением

первоначального образца МЖ-1 и небольшим добавлением ПАВ с целью поддержания стабилизации.

Видно, что кривая зависимости вязкости для данного образца практически совпадает с кривой образца МЖ-2.1.

Необходимо

заметить, что образец МЖ-2.1 имеет большую намагниченность

насыщения ($M_s = 33$ кА/м) чем образец МЖ-1.1 ($M_s = 20,07$ кА/м), при этом зависимости вязкости идут одинаково. Это можно объяснить тем, что, несмотря на большую намагниченность, в образце МЖ-2.1 содержится гораздо большее количество ПАВ ($\varphi_{\text{ПАВ}^+} = 4,1$ %), в 2 раза больше чем в образце МЖ-1.1 ($\varphi_{\text{ПАВ}^+} = 2,3$ %). Что позволяет сделать вывод о том, что наличие избытка ПАВ уменьшает величину относительного приращения вязкости под действием магнитного поля (магнитовязкий эффект). В малоцентрированных образцах приращение вязкости составляет порядка 3 %, а в исходных (неразбавленных) образцах порядка 7 %. Данное различие объясняется межчастичными взаимодействиями в концентрированных образцах, и образованием агрегатов в них.

Выполнено экспериментальное исследование влияния структуры на динамические характеристики бидисперсных систем на основе МЖ в цилиндрической оболочке от напряженности магнитного поля в образцах МЖ-3.1.1–МЖ-3.1.3. Для получения бидисперсных систем в образец МЖ-3.1 добавлялись частицы магнетита с размером $d_{\text{ср}} = 300$ нм. Их доля составляла 1 %, 5 % и 10 % от массы твердой фазы, и соответственно были получены жидкости МЖ-3.1.1–МЖ-3.1.3 путем механического и ультразвукового перемешивания частиц магнетита и исходного образца МЖ. Последующее исследование показало отсутствие разделения фаз и формирования осадка в образцах

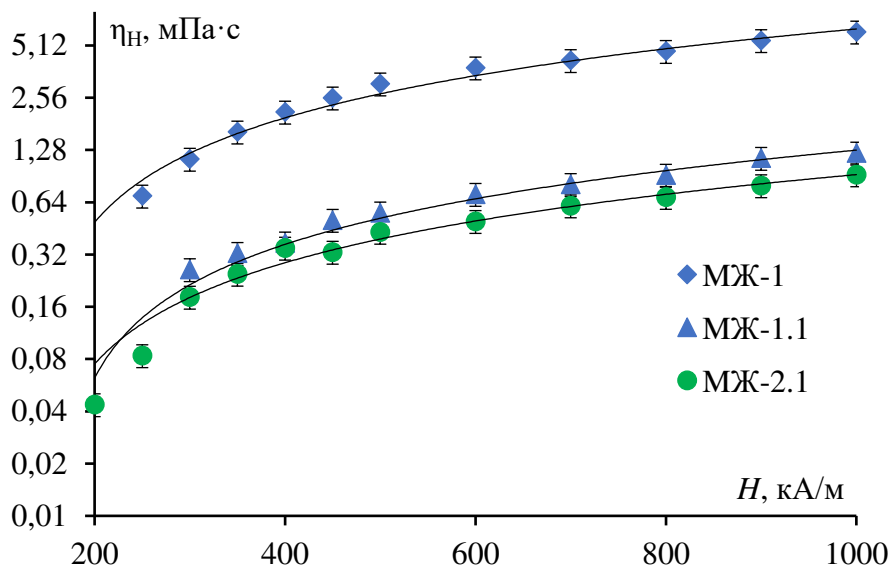


Рисунок 5 – Зависимости вязкости от напряженности магнитного поля для образцов МЖ-1, МЖ-1.1, МЖ-2.1

МЖ-3.1.1–МЖ-3.1.3. Полученные бидисперсные системы оказались стабильными. Физические параметры образцов представлены в таблице 1.

На основе формулы (3) были построены зависимости вязкости для образцов МЖ-3.1, МЖ-3.1.1–МЖ-3.1.3, представленные на рисунке 6.

Полученные зависимости вязкости показывают, что увеличение вязкости сильнее всего проявляется в образце с 10 % крупных магнитных частиц. Увеличение концентрации магнитных микрочастиц в МЖ усиливает взаимодействие между частицами и повышает

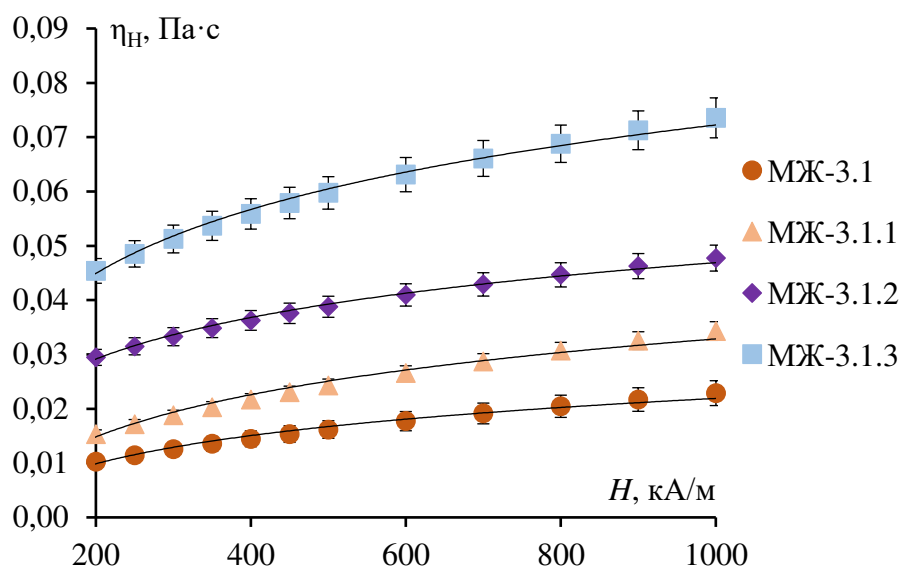


Рисунок 6 – Зависимости вязкости от напряженности магнитного поля для образцов МЖ-3.1, МЖ-3.1.1–МЖ-3.1.3

пристеночную вязкость бидисперсной системы на основе МЖ.

Альтернативным способом определения вязкости МЖ является формула Гельмгольца [2]:

$$\eta = \frac{\beta^2 d^2 \rho}{2(2\pi\nu + \beta)}, \quad (4)$$

где β , ν – коэффициент затухания и частота сдвиговых колебаний объема МЖ.

Данное выражение позволяет получить оценку вязкости из анализа физических зависимостей частоты колебаний и коэффициента затухания МЖ, не исследуя ее магнитные параметры. На основании формулы (4) были получены зависимости вязкости от температуры в диапазоне 5–60 °С и напряженности магнитного поля 150–900 кА/м для образцов МЖ-4.1 и МЖ-4.2, представленные на рисунке 7.

На основании известного выражения [3] $\Delta\eta = (\eta - \eta_0)/\eta$ был рассчитан магнитовязкий эффект, зависимость которого от напряженности магнитного поля и температуры представлена на рисунке 8 для обоих образцов в одном масштабе. Данные хорошо коррелируют с экспериментом, что может говорить о том, что выражение (4) адекватно описывает вязкоупругие характеристики левитирующего объема МЖ в условиях сдвиговых воздействий и даёт лучший результат при интерпретации зависимости вязкости и магнитовязкого эффекта от напряженности магнитного поля и температуры. Что позволяет сделать вывод о том, что изменение вязкости при рассмотрении в широком диапазоне параметров состояния МЖ возникает в результате наложения как вклада МЖ как жидкого коллоида, свойства которого зависят от температуры, так и его магнитных свойств, которые, в свою очередь, зависят от приложенного поля.

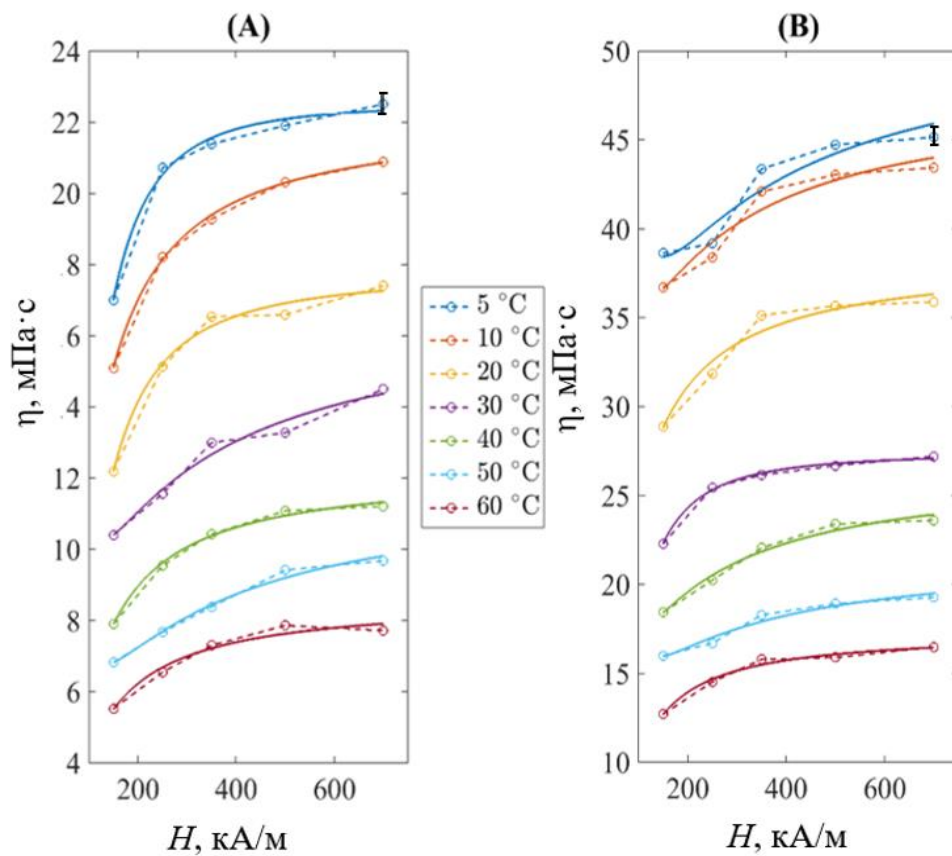


Рисунок 7 – Зависимость вязкости МЖ-4.2 (А) и МЖ-4.1 (В) от напряжённости магнитного поля и температуры, рассчитанные по формуле (5)

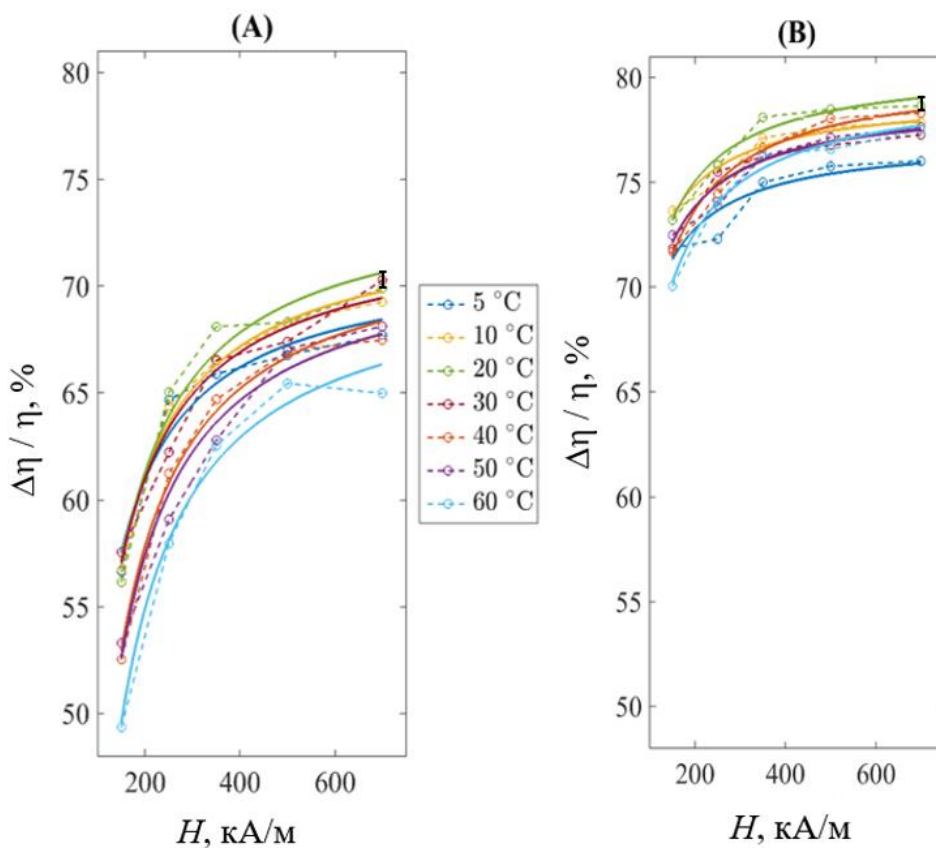


Рисунок 8 – Зависимость магнито-вязкого эффекта для МЖ-4.2 (А) и МЖ-4.1 (В) от напряжённости магнитного поля и температуры

При этом предложенный экспериментальный метод определения вязкости на основе осциллирующего в магнитном поле объема МЖ, ограниченного цилиндрической поверхностью, имеет преимущество, так как эксперимент происходит при малом смещении образца из положения равновесия, в результате чего образовавшиеся под воздействием внешнего магнитного поля структуры в МЖ не разрушаются. Другим достоинством данного метода является исследование вязкости в условиях сдвиговых колебаний, которые совершает рабочее тело из МЖ в распространенных вариантах амортизаторов, герметизаторов, акустических систем и датчиков на основе МЖ.

В главе 5 приведены данные экспериментального исследования динамики системы «магнитная жидкость – газовая полость», ограниченной цилиндрической оболочкой с капиллярами различного диаметра, в магнитном поле кольцевого постоянного магнита.

Оценка коэффициента затухания в данной системе была проведена с использованием выражения:

$$\beta_p = \frac{\pi d^4 l}{4m_f r^4} \cdot \frac{\eta_g}{1 + \omega^2 (2\psi l \eta_g d^2 h_0 / r^4 \gamma P_0)^2}, \quad (5)$$

где d – диаметр трубки, l – длина капилляра, m_f – масса объема МЖ, r – радиус капилляра, η_g – вязкость газа, ω – круговая частота затухающих колебаний свободного объема МЖ, ψ – численный коэффициент, h_0 – высота газовой полости, γ – коэффициент Пуассона для газа, P_0 – давление газа в полости в отсутствие колебаний.

В результате эксперимента на образце МЖ-1, физические свойства которого представлены в таблице 1, с капиллярами различного диаметра от 0,16 мм до 1,43 мм было установлено, что при радиусе капилляра 0,3 мм наблюдается наибольший коэффициент затухания.

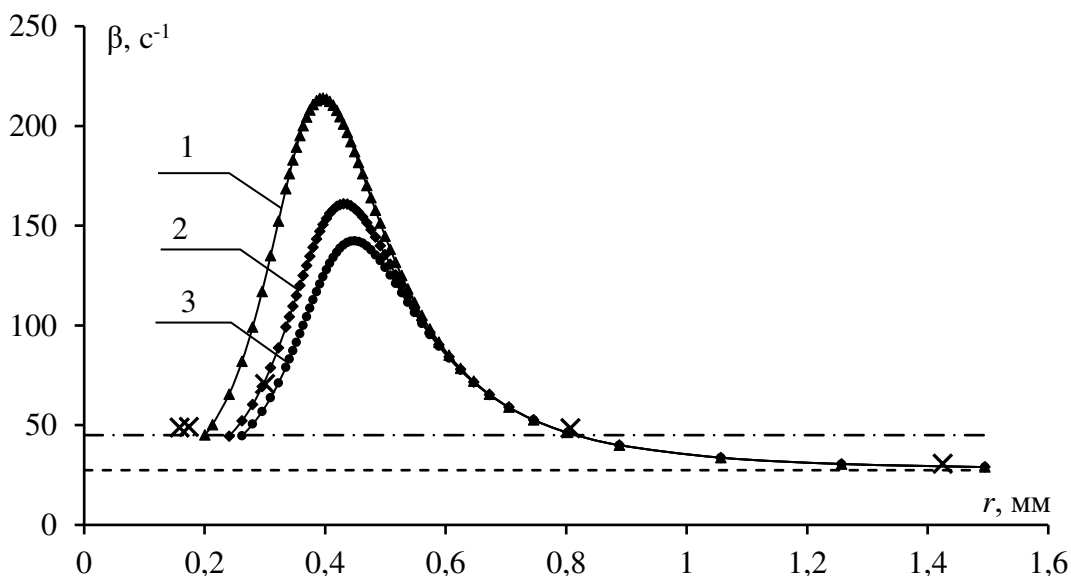


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента затухания от радиуса капилляра для газовой полости при $h_0 = 2$ см

Кривые 1, 2 и 3 на рисунке 9 являются результатом теоретической оценки для различного значения коэффициента пси. Крестиками показаны экспериментальные данные. Пунктирной линией представлен коэффициент

затухания на установке «без дна», штрихпунктирной линией – коэффициент затухания на установке «с дном». Кривая 1 – для $\psi = 1$, кривая 2 – для $\psi = 1,5$, кривая 3 – для $\psi = 1,8$. Коэффициент ψ показывает, насколько коэффициент затухания учитывает турбулентные явления. Когда $\psi = 1$ – течение полностью ламинарное, $\psi = 1,5$, когда есть завихрения и $\psi = 1,8$ это когда много завихрений (турбулентное течение). Наибольшее соответствие экспериментальным данным значения коэффициента затухания получено для $\psi = 1,5$, когда имеет место наличие комбинации ламинарного и турбулентного течений. Таким образом, как экспериментально, так и теоретически установлена немонотонная зависимость коэффициента затухания от радиуса капилляра, заключающаяся в резком возрастании и после достижения максимума плавном снижении значения коэффициента затухания с увеличением радиуса капилляра. Использование полученных данных целесообразно при конструировании новых амортизаторов, поскольку магнитожидкостный демпфер с капиллярами способен погашать низкочастотные колебания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально на разработанной установке исследована динамика магнитной жидкости в цилиндрической оболочке в условиях магнитных, температурных и механических воздействий. Измерения проводились в магнитном поле напряженностью от 150 до 1000 кА/м и диапазоне температур от 5 до 60 °С. В качестве объекта исследования рассмотрены образцы магнитной жидкости с плотностью ρ от 897 до 1585 кг/м³, объемной концентрацией φ от 1,4 до 19 %, вязкостью η от 2,5 до 600 мПа·с, намагниченностью насыщения M_s от 8,7 до 60 кА/м, начальной магнитной восприимчивостью χ от 0,4 до 5,2 и бидисперсные системы на основе магнитной жидкости с добавлением частиц магнетита с размером $d_{cp} = 300$ нм с массовой долей от 1 до 10 %.

2. Установлено влияние физических свойств магнитной жидкости на динамику ее сдвиговых колебаний в магнитном поле. Экспериментально показано, что в высококонцентрированных образцах МЖ-1, МЖ-2.1 наблюдается увеличение коэффициента затухания сдвиговых колебаний в 1,5 и 1,9 раз соответственно. Тогда как для разбавленных образцов МЖ-1.1 и МЖ-2.2 эти параметры в магнитном поле увеличиваются в 1,39 и 1,4 раза соответственно, что связано с образованием цепочек и агрегатов в концентрированном образце.

3. Исследованы с использованием предложенной расчетной модели зависимости пристеночной вязкости от температуры и напряженности магнитного поля в условиях сдвиговых колебаний в образцах магнитной жидкости с различной структурой, технологией изготовления, жидкостями-носителями и концентрацией ПАВ. Установлено, что наличие свободного ПАВ в магнитной жидкости отрицательно влияет на приращение вязкости в магнитном поле.

4. Получены экспериментальные зависимости вязкости бидисперсных систем на основе МЖ от напряженности магнитного поля в сдвиговых колебаниях. Установлено, что концентрация крупных магнитных частиц в образце влияет на приращение вязкости в магнитном поле, которое обусловлено

усилением межчастичных взаимодействий и ростом агрегатов из них при увеличении концентрации крупных магнитных частиц.

5. Экспериментально показано, что при оценке магнитовязкого эффекта в условиях сдвиговых колебаний следует учитывать как вклад МЖ как жидкого коллоида, свойства которого зависят от температуры, так и его магнитных свойств, которые, в свою очередь, зависят от приложенного поля. Впервые предложен и апробирован экспериментальный метод определения вязкости на основе анализа частоты и коэффициента затухания осциллирующей в магнитном поле магнитной жидкости, ограниченной цилиндрической поверхностью, полученные данные коррелируют со значениями вязкости, полученными ротационной вискозиметрией.

6. Экспериментально исследована динамика колебаний магнитной жидкости, ограничивающей газовую полость с капиллярами различного диаметра от 0,16 до 1,43 мм, в цилиндрической оболочке в поле кольцевого постоянного магнита. Предложенная теоретическая интерпретация данного эксперимента объясняет наличие максимума на зависимости коэффициента затухания от радиуса капилляра и его уменьшение при увеличении объема газовой полости. Экспериментально определен оптимальный радиус капилляра, при использовании которого наблюдается наиболее интенсивное затухание колебаний системы «магнитная жидкость – газовая полость». Полученные данные согласуются с теоретическими расчетами, что создаёт предпосылки для использования данной колебательной системы на основе МЖ, ограничивающей газовую полость с капиллярами различного диаметра, в цилиндрической оболочке в поле кольцевого постоянного магнита в качестве физической модели магнитожидкостного амортизатора.

Список цитируемой литературы

[1] Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие: в 10 т., т. 6 Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Издание 5-е. – Москва : Физматлит, 2001. – 736 с.

[2] Springer handbook of acoustics / F. Dunn, W. M. Hartmann, D. M. Campbell, N. H. Fletcher. – Springer, 2015. – 1286 p.

[3] Odenbach S. Magnetic fluids / S. Odenbach // Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. Lecture Notes in Physics, V. 71. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. – P. 7–32.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ryapolov P. A. Temperature and field dependences of magnetic fluid's shear viscosity: Decoupling inputs from a carrier fluid and magnetic nanoparticles / P. A. Ryapolov, E. V. Shel'deshova, E. B. Postnikov // Journal of Molecular Liquids. – 2023. – V. 382. – P. 121887.

2. Shel'deshova E. Dynamics of Magnetic Fluids and Bidisperse Magnetic Systems under Oscillatory Shear / E. Shel'deshova, A. Churaev, P. Ryapolov // Fluids. – 2023. – V. 8. – №. 2. – P. 47.

3. Damping of an Oscillatory System with Incomplete Sealing of the Air Cavity by Magnetic Fluid / V. M. Polunin, P. A. Ryapolov, **E. V. Shel'deshova**, G. V. Karpova, V. M. Paukov // *Magnetohydrodynamics*. – 2020. – V. 56. – №. 4. – P. 377-392.

4. Ryapolov P. A. An alternative way to study magnetic fluid magnetization and viscosity / P. A. Ryapolov, V. M. Polunin, **E. V. Shel'deshova** // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – V. 496. – P. 165924.

5. Демпфирование колебательной системы с неполной герметизацией воздушной полости магнитной жидкостью / **Е. В. Шельдешова**, А. А. Чураев, Н. М. Игнатенко, Ю. А. Неручев, П. А. Ряполов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 128–145.

6. Динамика магнитных жидкостей и бидисперсных магнитных систем при колебательных сдвигах / **Е. В. Шельдешова**, П. А. Ряполов, А. Г. Рекс, А. В. Трепачев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2022. – Т. 12. – №. 3. – С. 130-146.

7. Динамика магнитных жидкостей, подвергающихся колебательному сдвигу / **Е. В. Шельдешова**, А. А. Чураев, И. А. Шабанова, П. А. Ряполов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2021. – Т. 11. – №. 4. – С. 137-148.

8. Вязкость магнитной жидкости при колебаниях в сильном магнитном поле / В. М. Полунин, П. А. Ряполов, А. И. Жакин, **Е. В. Шельдешова** // *Акустический журнал*. – 2019. – Т. 65. – №. 4. – С. 477-483.

Публикации в материалах конференций, индексируемых Scopus:

9. Dynamics of Levitated Volume of the Composite Bidisperse Magnetic System / **E. V. Shel'deshova**, A. A. Churaev, I. Y. Sutarina, A. V. Trepachev, P. A. Ryapolov // *2023 Seminar on Digital Medical and Environmental Systems and Tools (DMEST)*. – IEEE, 2023. – P. 133-135.

10. **Shel'deshova E. V.** Dynamics of Magnetic Fluids Undergoing Oscillatory Shear / E. V. Shel'deshova, A. A. Churaev, P. A. Ryapolov // *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. – IEEE, 2022. – P. 1082-1085.

11. Dynamics of Magnetic Fluid Cylinder in Inhomogeneous Magnetic Field / **E. V. Shel'deshova**, V. M. Polunin, A. A. Churaev, P. A. Ryapolov // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – V. 1945. – №. 1. – P. 012052.

12. Viscosity of Magnetic Fluid in Oscillation System in a Strong Magnetic Field / V. M. Polunin, P. A. Ryapolov, A. I. Zhakin, **E. V. Shel'deshova** // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. – V. 581. – №. 1. – P. 012017.

Подписано в печать 20.03.2024 г. Формат 60×84/16. Печать офсетная.

Усл. печ.л. 1.1, Тираж 100 экз. Заказ 15

Юго-Западный государственный университет.

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

