

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 537.84; 621.03

**МОЦАР**

**Александр Александрович**

**УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ  
ВИБРОЗАЩИТНЫМ УСТРОЙСТВАМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Минск 2017

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель      **РЕКС Александр Георгиевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:      **БАЙКОВ Валентин Иванович,**  
доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории турбулентности ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»;

**ЗУБКО Василий Иванович,**  
кандидат технических наук, заведующий лабораторией диэлектрической спектроскопии Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация      УО «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится «13» февраля 2018 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.13.01 при ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, корп. 3, конференц-зал, e-mail: sovet@itmo.by, телефон ученого секретаря (+375 17) 284-23-87; факс (+375 17) 292-25-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «4» января 2018 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 01.13.01,  
кандидат физико-математических наук

Жукова Ю. В.

© Моцар А. А., 2017  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Системы виброгашения (амортизаторы, подвески, опоры, гасители колебаний), использующие в качестве рабочей среды магнито- и электроуправляемые жидкости, находят свое применение в автомобиле- и авиационном, робототехнике и космической технике.

Среди виброзащитных устройств, использующих магнитную жидкость, достаточно перспективными являются гасители колебаний и опоры, в которых в качестве базового элемента используется упруго-демпфирующий элемент, представляющий собой каплю магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля. Такие отличительные особенности этого вида устройств как высокая эффективность гашения микровибраций с низкой частотой, простота конструкции, высокая надежность, малые габариты и масса позволяют применять их в космической технике, где особенно важным является минимизация массы систем виброзащиты. К основным недостаткам таких устройств относится отсутствие возможности управления их упруго-демпфирующими характеристиками. Подстройка характеристик таких устройств под частоту и амплитуду внешних вибраций позволит улучшить их виброзащитные свойства и расширить технический диапазон их действия. Наиболее простым с точки зрения реализации, но в тоже время эффективным способом управления характеристиками таких устройств является электромагнитное воздействие на их упруго-демпфирующий элемент.

Исследования, представленные в диссертации, посвящены изучению возможностей электромагнитного управления упруго-демпфирующими характеристиками магнитожидкостных инерционных элементов на основе капли магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля применительно к разработке управляемых магнитожидкостных гасителей колебаний и опор. В работе затронуты основные вопросы, связанные с конструированием таких устройств. Значительное внимание уделено технологии синтеза магнитной жидкости, устойчивой в неоднородном магнитном поле. Исследовано формирование ее свободной поверхности вокруг магнитных и намагничивающихся тел, а также влияние на этот процесс внешнего магнитного поля. Изучены упругие характеристики капель магнитных жидкостей при воздействии магнитного поля. Разработан управляемый упруго-демпфирующий элемент на основе капли магнитной жидкости и комбинированного источника магнитного поля. Представлена конструкция управляемого магнитожидкостного гасителя колебаний, а также выполнены исследования по изучению возможностей управления протекающими в нем диссипативными процессами.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнялась в рамках:

1. Государственных программ научных исследований:

1.1. «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» («Энергоэффективность»), (2013–2015 гг.).

Задание 2.2.15 «Развитие физико-химических методов получения специальных нанодисперсных магнитных жидкостей, оптимизация параметров и разработка уплотнительных и адаптивных виброзащитных устройств на их основе» (ГР № 20140675).

1.2. «Исследование энерго- и массопереноса в сложных системах и разработка новых технологий, устройств и систем управления переносом энергии и вещества в различных средах и объектах, обеспечивающих снижение энерго- и материалоемкости базовых процессов в отраслях народного хозяйства» («Энергоэффективность») (2011–2013 гг.).

Задание «Энергоэффективность 1.2.7.» «Исследование гидродинамики и теплопереноса в магниточувствительных газожидкостных системах, в том числе с фазовыми превращениями, под воздействием внешних переменных во времени магнитных полей с целью установления эффективных механизмов управления этими процессами» (ГР № 20110366).

Задание «Энергоэффективность 2.1.16.» «Исследование гидродинамических процессов, энерго- и массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях под воздействием внешних электромагнитных полей применительно к разработке новых адаптивных устройств диссипации энергии на их основе» (ГР № 20110365).

2. Проекты Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований:

2.1. Т 10P-133 от 01.05.2010 г. «Гистерезисные явления при изменении формы магнитной жидкости в магнитном поле» (ГР № 20102558);

2.2. Т 12P-163 от 15.04.2012 г. «Деформация свободной поверхности магнитной жидкости в электромагнитных полях» (ГР № 20123146);

2.3. Т 14P-179 от 23.05.2014 г. «Поведение конечных объемов сред, взаимодействующих с электрическим или магнитным полем, и тел, окруженных такими средами» (ГР № 20142529).

### **Цели и задачи исследования**

**Цель работы** □ установить закономерности влияния магнитного поля на упругие и демпфирующие характеристики ограниченных объемов магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля применительно к разработке управляемых магнитожидкостных виброзащитных устройств.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Усовершенствовать методики синтеза магнитных жидкостей, обладающих повышенной устойчивостью в гравитационном и сильно неоднородном магнитном поле.
2. Изучить процессы формирования объемов магнитной жидкости со свободной поверхностью вокруг магнитных и намагничивающихся тел, а также исследовать влияние внешнего магнитного поля на эти процессы.
3. Изучить упругие характеристики ограниченных объемов магнитной жидкости при переменном значении магнитного поля внутреннего источника, формирующего эти объемы.
4. Изучить диссипативные процессы, происходящие при колебании ограниченных объемов магнитной жидкости при переменном значении магнитного поля внутреннего источника, формирующего эти объемы.

#### **Научная новизна**

Научную новизну работы составляют экспериментально установленные закономерности деформирования свободной поверхности магнитной жидкости над намагничивающимися телами сферической и цилиндрической формы во внешнем однородном магнитном поле при его различной ориентации относительно изначально плоской свободной поверхности магнитной жидкости.

В работе впервые представлены результаты исследований упруго-демпфирующих характеристик ранее не рассматривавшейся системы, представляющей собой ограниченный объем магнитной жидкости, сформированный вокруг комбинированного магнита, состоящего из постоянного магнита и электромагнита с сердечником. Впервые показана возможность управления упруго-демпфирующими характеристиками (коэффициентом упругости и временем релаксации колебаний) такой системы путем изменения магнитного поля комбинированного магнита.

#### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

1. Новый инерционный элемент с адаптивными упруго-демпфирующими характеристиками, представляющий собой каплеобразный объем магнитной жидкости, сформированный вокруг комбинированного магнита, состоящего из постоянного магнита и электромагнита с сердечником из магнитомягкого материала.
2. Новые экспериментальные закономерности деформирования свободной поверхности магнитной жидкости над сферическими и цилиндрическими телами, намагничивающимися во внешних однородных магнитных полях напряженностью до 25 кА/м для жидкостей с намагниченностью насыщения до 44 кА/м.

3. Экспериментально обнаруженное критическое значение напряженности тангенциального к плоской поверхности жидкости магнитного поля, при котором происходит скачкообразный разрыв слоя жидкости над сферическим и цилиндрическим намагничивающимися телами с образованием воздушного канала, а также наличие гистерезиса формы поверхности жидкости в диапазоне полей от 8 до 22 кА/м и толщин слоя жидкости от 0,7 до 1,6 радиуса намагничивающихся тел.

4. Критериальные зависимости силы упругости, действующей на магнит в ограниченном объеме магнитной жидкости в плоскопараллельном канале, от высоты канала при соотношении полувысоты магнита к его радиусу в диапазоне от 1/6 до 2, подтверждающие возможность трехкратного увеличения силы упругости при изменении напряженности поля магнита.

5. Уменьшение до 34% коэффициента упругости капли магнитной жидкости на комбинированном магните с соотношением полувысоты к радиусу 1:2.25 в клиновидной симметричной полости с углом раствора 2,5 град, при уменьшении поля магнита от 84 до 58 кА/м и увеличение до 150% коэффициента упругости такой капли при увеличении магнитного поля от 84 до 112 кА/м.

6. Новые экспериментальные закономерности затухания свободных колебаний демпфируемого объекта с собственной частотой 1 Гц, начальной амплитудой до 5 мм и массой не более 25 масс установленного на него гасителя колебаний с объемом магнитной жидкости на комбинированном магните, подтверждающие уменьшение относительного времени релаксации до 47% при увеличении напряженности магнитного поля от 41,4 до 100,9 кА/м.

#### **Личный вклад соискателя**

Соискатель лично синтезировал образцы магнитных жидкостей. Участвовал в разработке установок, методик экспериментальных исследований, лично выполнял все экспериментальные исследования, обработку и обобщение их результатов. Постановка задач исследований, обсуждение и теоретический анализ результатов выполнены совместно с научным руководителем д-р физ.-мат. наук, проф. Рексом А. Г. Обсуждение полученных результатов и подготовка материалов к публикациям выполнены также совместно с д-р физ.-мат. наук, проф. Баштовым В. Г. и другими соавторами публикаций. Методика синтеза магнитной жидкости усовершенствована под руководством старшего научного сотрудника НИЛ «Термомеханика магнитных жидкостей» Сулоевой Л. В. Постановка и решение теоретических задач выполнены совместно с д-р физ.-мат. наук, проф. Краковым М. С.

### **Апробация диссертации и использование ее результатов**

Основные результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8-й, 10-й, 11-й, 12-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2010, 2012–2014); Международной научно-практической конференции «Информационная безопасность: философские, правовые, этические, психологические, институциональные, технологические аспекты деятельности» (г. Минск, 2012); семинаре «Энергетика и охрана окружающей среды» (г. Минск 2012); на 13-й и 14 Международной конференции по магнитным жидкостям (Индия, г. Нью-Дели, 2013; Россия, г. Екатеринбург, 2016); на IV-й Всероссийской научной конференции «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (г. Ставрополь, 2013); международной конференции «Физика и технология наноматериалов и структур» (Россия, г. Курск, 2013); на 16-й и 17-й международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям (Россия, г. Плес, 2014, 2016); на Научно-технической конференции «Информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (г. Минск, 2014, 2016); на Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в технических, правовых, политических и социально-экономических системах» (г. Минск, 2017).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 30 научных работах общим объемом 5,5 авторских листа, из них 6 статей в международных и отечественных рецензируемых журналах, 21 работа в сборниках материалов и тезисов международных научно-технических конференций, 3 патента на изобретение Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 175 страниц, включая 80 рисунков, 2 таблицы, список использованной литературы из 101 наименования на 8 страницах и приложение на 3 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** представлен литературный обзор методов виброзащиты. Рассмотрены существующие конструкции устройств виброгашения на основе магнитоуправляемых сред.

Особое внимание уделено магнитожидкостным виброзащитным устройствам, в качестве инерционного элемента которых используется система магнит – магнитная жидкость. Выделены преимущества таких

устройств, указаны их недостатки. Сделан вывод о необходимости реализации управления упруго-демпфирующими характеристиками инерционного элемента магнитожидкостных устройств виброзащиты на основе системы магнит – магнитная жидкость. Сформулирована цель диссертационных исследований. Выделены основные этапы разработки такого типа устройств. Выполнен литературный обзор исследований, являющихся научной основой для реализации каждого из этапов разработки. В результате анализа литературных источников определены основные задачи диссертационного исследования.

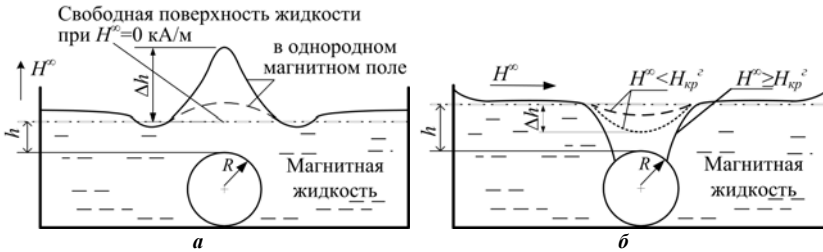
**Во второй главе** описана усовершенствованная методика синтеза магнитной жидкости, защищенная патентом [30], отличительной особенностью которой является объединение процессов осаждения и пептизации магнетита. По данной методике получен набор магнитных жидкостей на основе керосина и трансформаторного масла. Для обозначения образцов приняты следующие аббревиатуры: для жидкостей на основе керосина – МК, на основе трансформаторного масла – ММТр, на водной основе – МВ. Цифры, следующие за аббревиатурой, обозначают намагниченность насыщения жидкости, округленную до целого числа.

Описаны методики измерения физических свойств магнитных жидкостей, а также представлены физические свойства образцов магнитных жидкостей, использованных в экспериментальных исследованиях диссертационной работы.

**В третьей главе** представлены результаты исследований формирования свободной поверхности магнитной жидкости намагничивающимися во внешнем поле телами различной конфигурации, а также постоянными магнитами.

В экспериментальных исследованиях по изучению формирования свободной поверхности магнитной жидкости намагничивающимися телами рассматривается плоский слой магнитной жидкости со свободной поверхностью с расположенным внутри намагничивающимся шаром, либо цилиндрическим стержнем на некоторой глубине относительно поверхности жидкости. Система находится во внешнем однородном магнитном поле, генерируемом катушками Гельмгольца. Из-за локального искажения магнитного поля намагничивающимся телом поверхность магнитной жидкости становится неплоской. Постановка задачи и схематичное изменение формы поверхности жидкости в однородном магнитном поле нормального и тангенциального направления к изначально плоской равновесной поверхности магнитной жидкости представлены на рисунке 1.





*a* – нормальное направление поля; *б* – тангенциальное направление поля

Рисунок 1. – Геометрия эксперимента

В экспериментах изменение формы свободной поверхности фиксировалось фоторегистрацией, а амплитуда деформации  $\Delta h$  свободной поверхности измерялась микрометрическим щупом. Напряженность внешнего магнитного поля варьировалась в диапазоне от 0 до 25 кА/м. Изменение напряженности магнитного поля осуществлялось квазистатически, с выдержкой постоянного значения напряженности магнитного поля более 1 минуты.

В поле нормального направления деформирование поверхности происходит с образованием возвышения над намагничивающимися телами. Форма деформированной поверхности, а также амплитуда деформации определяются магнитными свойствами жидкости и толщиной ее слоя над телом. Значительное влияние на форму деформированной поверхности могут оказывать эффекты, связанные с неустойчивостью плоского слоя магнитной жидкости, что выражается появлением над намагничивающимися телами пиков локальной неустойчивости и резким ростом амплитуды деформации поверхности при достижении полем некоторого критического значения напряженности.

В тангенциальном к изначально плоской поверхности жидкости поле деформирование поверхности происходит с образованием углубления над намагничивающимися телами. В тангенциальном поле при деформировании поверхности может происходить скачкообразный разрыв слоя жидкости с образованием воздушного канала над телом. В некотором диапазоне толщин слоя жидкости наблюдается гистерезис формы свободной поверхности жидкости: смыкание воздушного канала над телом происходит в полях меньших, чем поля, в которых он образуется.

В заключительной части третьей главы теоретически и экспериментально рассмотрено формирование свободной поверхности магнитной жидкости вокруг постоянного магнита. Теоретическая задача решена в следующей постановке (рисунок 2): магнит цилиндрической формы полувысотой  $h$  и радиусом  $R$  основанием жестко закреплен на твердой

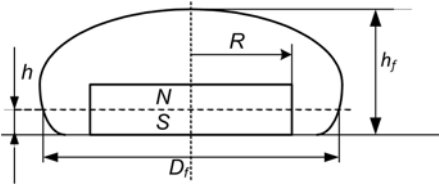


Рисунок 2. – Геометрия задачи

немагнитной поверхности, магнитные силы значительно преобладают над остальными силами, действующими на каплеобразный объем жидкости, размагничивающим полем жидкости пренебрегается, форма свободной поверхности жидкости соответствует линии

постоянной напряженности магнитного поля магнита  $H = \text{const}$ . Напряженность поля вычислялась по известным формулам для цилиндрического магнита, намагниченного вдоль вертикальной оси симметрии:

$$H_z = \frac{M}{2\pi} \sum_{k=1}^2 (-1)^k \int_{r-R}^{r+R} \frac{z_k}{x^2 + z_k^2} \sqrt{\frac{R^2 - (x-r)^2}{R^2 + z_k^2 + 2xr - r^2}} dx, \quad (1)$$

$$H_r = \frac{M}{2\pi} \sum_{k=1}^2 (-1)^k \int_{r-R}^{r+R} \frac{x}{x^2 + z_k^2} \sqrt{\frac{R^2 - (x-r)^2}{R^2 + z_k^2 + 2xr - r^2}} dx, \quad (2)$$

где  $H_z$ ,  $H_r$  – осевая и радиальная составляющая поля, А/м;

$M$  – намагниченность материала, А/м;

$z_{1,2} = z \pm h$ .

Значение напряженности магнитного поля на свободной поверхности жидкости рассчитывалось методом дихотомии.

В результате теоретических расчетов показано, что формирование капли вокруг магнита происходит так, что для магнита с  $h/R \leq 0,5$  с ростом объема капли его покрытие жидкостью происходит от боковой поверхности к поверхности основания магнита. Для  $h/R \geq 1$  процесс покрытия магнита происходит в противоположном направлении.

Экспериментально определены высота  $h_f$  и диаметр  $D_f$  (рисунок 2) капли, сформированной в условиях гидроневесомости вокруг цилиндрического феррит-бариевого магнита радиусом 18 мм и полувысотой 6 мм ( $h/R = 1/3$ ). Теоретические и экспериментальные зависимости геометрических размеров капли от ее объема в безразмерном виде для такого магнита представлены на рисунке 3.

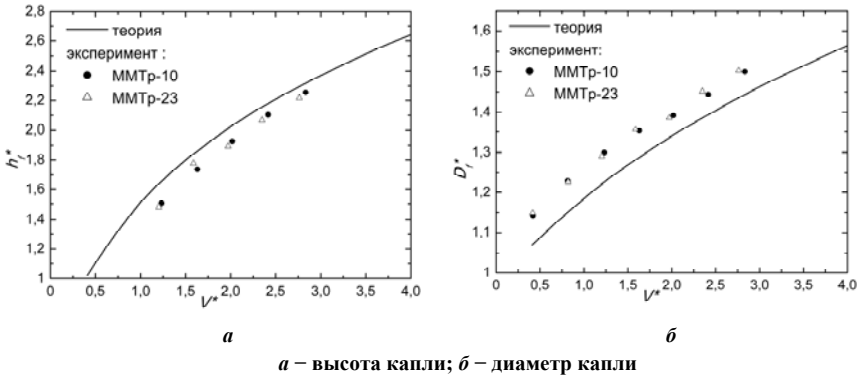


Рисунок 3. – Зависимости геометрических размеров капли от ее объема

В качестве характерных величин для объема капли принят объем магнита, для высоты и диаметра капли – высота и диаметр магнита.

Показана возможность изменения формы поверхности магнитной жидкости вокруг постоянного магнита, за счет воздействия дополнительного внешнего магнитного поля. Фотографии капли при различном значении внешнего однородного магнитного поля представлены на рисунке 4.

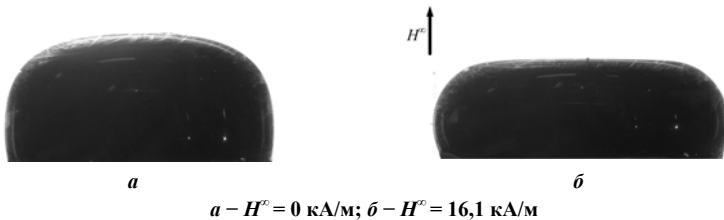


Рисунок 4. – Форма поверхности магнитной жидкости вокруг постоянного цилиндрического магнита

Характер изменения формы зависит от соотношения направлений поля магнита и внешнего поля.

В четвертой главе теоретически и экспериментально исследованы упругие характеристики капли магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля, расположенной в каналах плоскопараллельной и клиновидной формы.

В первой части четвертой главы представлены результаты теоретического исследования упругих характеристик капли, деформируемой плоскопараллельными пластинами. Геометрия задачи изображена на рисунке 5. Капля магнитной жидкости  $l$  с комбинированным магнитом находится между

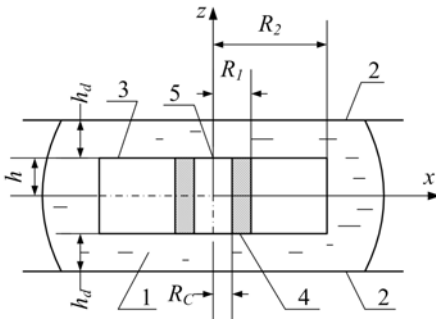


Рисунок 5. – Геометрия задачи

жидкости симметрично относительно пластин, а расстояние  $h_d$  между любой из пластин и ближайшим к ней основанием магнита одинаково. Поперечное перемещение пластин по направлению друг к другу приводит к деформации капли и изменению силы упругости препятствующей этому перемещению. Считая напряженность магнитного поля много большей намагниченности жидкости и пренебрегая магнитным скачком давления и размагничивающим фактором, сила упругости, действующая на пластину со стороны жидкости, определялась как

$$F = -\mu_0 \oint_s \left( \int_0^H M dH \right) \vec{n} dS, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\vec{n}$  –

внешняя к поверхности тела нормаль.

Намагниченность жидкости  $M$  задавалась следующей аппроксимацией:

$$M = M_S \frac{H}{H_T + H}, \quad (4)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения жидкости;

$H$  – напряженность магнитного поля комбинированного магнита;

$H_T$  – напряженность поля при котором намагниченность жидкости  $M = M_S/2$ .

Для определения напряженности поля  $H$  комбинированный магнит рассматривался как три сплошных цилиндрических магнита (см. рисунок 5) радиусами  $R_2$ ,  $R_1$  с намагниченностью  $M_m$ , равной намагниченности материала кольцевого магнита, и  $R_C$  с намагниченностью  $M_C$ , равной

двумя плоскопараллельными пластинами 2. Комбинированный магнит представляет собой постоянный кольцевой магнит 3 с внутренним и внешним радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , во внутреннем отверстии которого расположен электромагнит 4 с сердечником 5 из магнитомягкого материала. Радиус сердечника электромагнита –  $R_C$ . Полувысота магнитной системы  $h$ . Действием силы тяжести пренебрегается, магнит расположен в

намагниченности материала сердечника электромагнита, для каждого из которых по формулам (1) определялась напряженность магнитного поля. Результирующее поле всей системы  $H$  рассчитывалось по принципу суперпозиции. Площадь касания  $S$  поверхности жидкости с пластиной рассчитывалась на основе теории по определению формы поверхности жидкости, представленной в третьей главе.

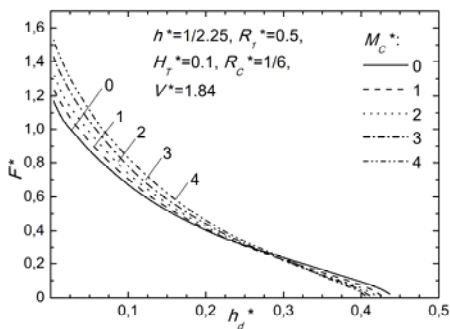


Рисунок 6. – Зависимость силы упругости от расстояния  $h_d^*$  для различных значений  $M_C^*$

В результате теоретических расчетов были получены критериальные зависимости безразмерной силы упругости  $F^*$  от безразмерного расстояния  $h_d^*$ . Определено влияние на силу упругости магнитного поля комбинированного магнита, изменение которого характеризовалось изменением безразмерной намагниченности материала сердечника  $M_C^*$ . Изменение намагниченности сердечника  $M_C^*$  приводит к изменению силы упругости (рисунок 6). Характер изменения этой силы определяется

изменением магнитного давления в жидкости и изменением площади касания  $S^*$  капли с пластиной. При начальной деформации капли может наблюдаться обратная зависимость силы упругости от намагниченности сердечника за счет уменьшения площади касания  $S^*$  (рисунок 7,  $h_d^* \geq 0.35$ ), а также за счет уменьшения напряженности магнитного поля в области касания жидкости с пластиной (рисунок 8,  $x \geq 0,5$ ).

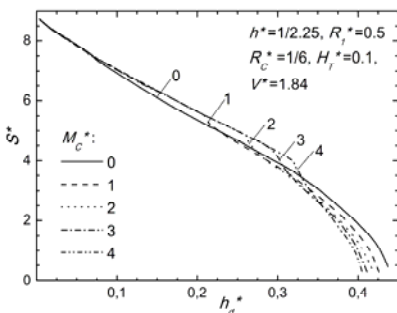


Рисунок 7. – Площадь касания  $S^*$  капли с пластиной для различных значений  $M_C^*$

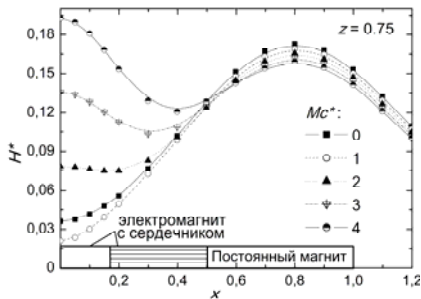


Рисунок 8. – Напряженность магнитного поля в области касания капли с пластиной

Граничное положение пластины, при котором наблюдается переход от обратной зависимости к прямой тем больше, чем больше изменение намагниченности сердечника. В результате расчетов определено влияние на силу упругости и возможный диапазон ее изменения объема капли, магнитных свойств жидкости и размеров комбинированного магнита.

В экспериментальном исследовании упругих характеристик капли в качестве источника магнитного поля использовался как цилиндрический постоянный магнит, так и комбинированный магнит. Перемещение пластин друг относительно друга фиксировалось катетометром и происходило под действием силы тяжести груза, в качестве которого использовался набор разновесов известной массы.

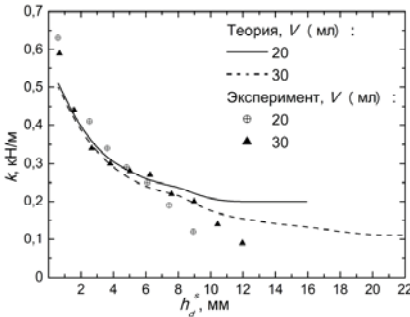


Рисунок 9. – Коэффициент упругости

магнитными свойствами. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей показали, что зависимости силы упругости от расстояния  $h_d^s$  согласуются на качественном уровне. На количественном уровне хорошо совпадают теоретические и экспериментальные коэффициенты упругости капель (рисунок 9), а также значения диапазона изменения силы упругости, происходящего при включении электромагнита комбинированного источника.

Упругие характеристики капли магнитной жидкости с комбинированным магнитом экспериментально изучались и в каналах клиновидной формы. Геометрия задачи представлена на рисунке 10. Капля магнитной жидкости 1, сформированная вокруг комбинированного магнита 2, располагается в канале клиновидной формы 3 с заданным значением угла раствора канала  $\gamma$ . Комбинированный магнит состоит из постоянного феррит-бариевого кольцевого магнита, во внутреннее отверстие которого помещен электромагнит с сердечником. Включение электромагнита приводит

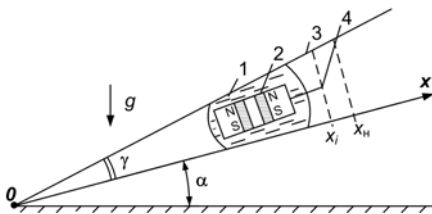


Рисунок 10. – Геометрия эксперимента

к другой пластине друг относительно друга фиксировалось катетометром и происходило под действием силы тяжести груза, в качестве которого использовался набор разновесов известной массы.

В ходе эксперимента получены зависимости силы упругости от суммарного расстояния  $h_d^s$ , мм от верхней и нижней пластины до поверхности магнита для капель различных объемов и жидкостей с различными

магнитными свойствами. Включение электромагнита приводит

к изменению напряженности магнитного поля магнитной системы. Положение магнита регистрировалось по немагнитному маячку 4. При наклоне канала на угол  $\alpha$  капля с магнитом из начального положения  $x_n$  смещается в узкую часть канала. Этому смещению препятствует сила упругости капли, возникающая вследствие ее деформации и уравнивающая составляющую силы тяжести. В результате эксперимента получены зависимости силы упругости от положения капли в канале при различных токах, подаваемых на электромагнит (рисунок 11). На основе полученных зависимостей определены коэффициенты упругости капли (рисунок 12), расположенной в плоском симметричном клиновидном канале. Также экспериментально определены коэффициент упругости и собственная частота колебаний капли в клиновидном канале с осевой симметрией.

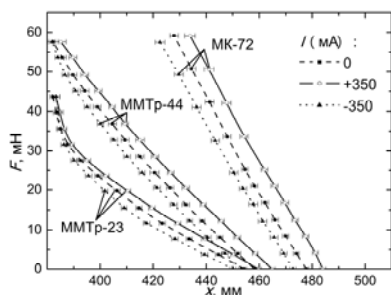


Рисунок 11. – Зависимости силы упругости от положения капли в канале,  $V$  капли 10 мл,  $\gamma = 2,5$  град

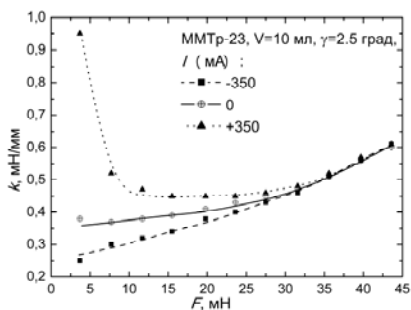


Рисунок 12. – Зависимость коэффициента упругости капли от внешней силы

Установлено, что подача тока на электромагнит в исследованном диапазоне параметров приводит к изменению силы упругости действующей на каплю, тем самым позволяя изменять ее положение в канале клиновидной формы. Использование такой капли в гасителях колебаний с клиновидной симметричной внутренней полостью в качестве инерционного элемента дает возможность управления ее коэффициентом упругости и собственной частотой колебаний, путем изменения тока, подаваемого на электромагнит.

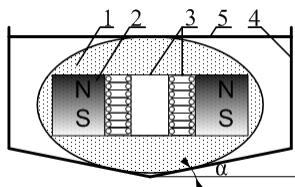


Рисунок 13. – Гаситель колебаний

В пятой главе экспериментально исследована возможность управления диссипативными процессами в магнитожидкостном динамическом гасителе колебаний (рисунок 13), в качестве инерционного элемента которого используется капля магнитной жидкости  $I$  с комбинированным магнитом, состоящим из феррит-бариевого

кольцевого магнита 2 и электромагнита с сердечником 3. Инерционный элемент расположен в цилиндрическом немагнитном корпусе 4. Дно внутренней полости корпуса выполнено конусообразной формы. Крышка корпуса 5 касается свободной поверхности магнитной жидкости, но не деформирует ее при симметричном положении инерционного элемента относительно вертикальной оси корпуса. Магнитное поле комбинированного магнита изменяется подачей тока различного направления на электромагнит и характеризуется напряженностью  $H$  в точке, лежащей на оси симметрии магнита, на его торцевой поверхности.

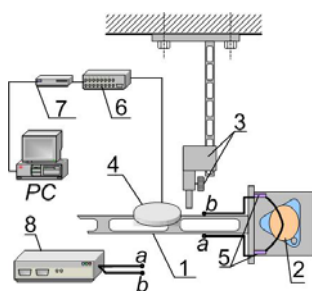


Рисунок 14. – Измерительный комплекс

использован измерительный комплекс, состоящий из датчика ускорения 4, усилителя аналогового сигнала 6, фильтра низких частот и аналого-цифрового преобразователя 7. Включение электромагнита инерционного элемента осуществлялось через клеммы 5 блоком питания 8. Осциллограммы колебаний выводились на электронный осциллограф с последующей записью на компьютер через программу Data Logger.

По осциллограммам колебаний определялся средний логарифмический декремент затухания системы с последующим определением среднего времени релаксации, как отношения декремента затухания к периоду колебаний. Влияние гасителя на время затухания колебаний балки оценивалось по значению относительного времени релаксации  $\tau_{отн}$ , равного отношению времени релаксации балки с гасителем колебаний  $\tau_{рел}^g$  к времени релаксации балки с установленным на нее вместо гасителя грузом, равным по массе гасителю колебаний  $\tau_{рел}^0$ .

Под действием вибраций демпфируемого объекта происходит перемещение инерционного элемента относительно корпуса гасителя колебаний, что приводит к диссипации вибрационной энергии за счет вязкого трения. В результате время релаксации колебаний демпфируемого объекта снабженного гасителем уменьшается.

Экспериментальный стенд представлен на рисунке 14. В качестве вибрирующего объекта использована протяженная балка 1 длиной 3 м, массой 5 кг, на консольном конце которой закреплен гаситель колебаний 2. Отклонение балки на заданную ограничителем 3 начальную амплитуду, приводило к ее свободным колебаниям с собственной частотой около 1 Гц. Колебания системы совершались в горизонтальной плоскости, перпендикулярной осям симметрии корпуса гасителя и комбинированного магнита. Для записи осциллограмм колебаний



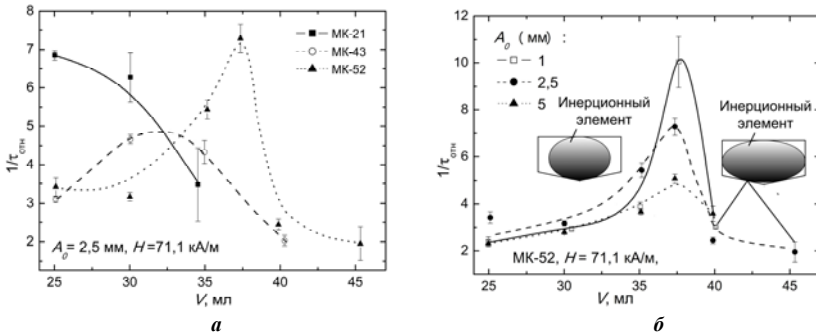


Рисунок 15. – Зависимость величины обратной относительному времени релаксации от объема капли

Установлено, что максимальное значение обратной величины относительного времени релаксации колебаний достигается при оптимальном соотношении намагниченности жидкости и ее объема (рисунок 15, *a*), обеспечивающем максимальную амплитуду колебаний инерционного элемента при заданных параметрах внешних вибраций. При оптимальном соотношении намагниченности жидкости и ее объема начальная амплитуда колебаний оказывает существенное влияние на относительное время релаксации (рисунок 15, *б* объем капли  $V = 37.5$  мл).

Изменение конфигурации магнитного поля комбинированного магнита за счет управляющего тока позволяет подстраивать собственную частоту колебаний инерционного элемента под частоту колебаний балки. В результате возрастает амплитуда колебаний инерционного элемента, что приводит к увеличению диссипации энергии колебаний и снижению времени релаксации.

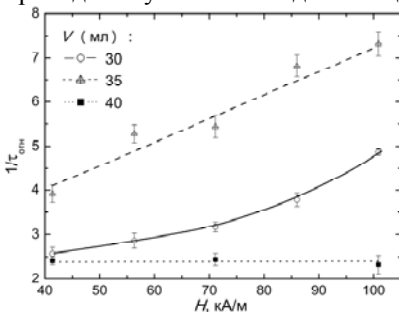


Рисунок 16. – Влияние магнитного поля на обратную величину относительного времени релаксации

Для объемов капли 30 и 35 мл (рисунок 16) снижение относительного времени релаксации составляет 47% относительно его наибольшего значения. Установлено, что для больших объемов капли влияние управляющего тока на время релаксации может снижаться, если в процессе колебаний либо в стационарном положении происходит касание капли боковых стенок корпуса гасителя (рисунок 16 объем капли  $V = 40$  мл).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Представлена усовершенствованная методика синтеза магнитных жидкостей на основе керосина, минеральных и силиконовых масел, позволяющая получать устойчивые в гравитационном и сильно неоднородных магнитных полях магнитные жидкости с сильными магнитными свойствами [10, 15, 23, 25, 30].

2. Получены новые экспериментальные закономерности деформирования свободной поверхности магнитной жидкости с намагниченностью насыщения до 44 кА/м во внешнем однородном магнитном поле напряженностью до 25 кА/м вокруг намагничивающихся тел цилиндрической и сферической формы. Экспериментально установлено, существование критических значений напряженности магнитного поля, при достижении которых происходит качественное скачкообразное изменение формы свободной поверхности магнитной жидкости над намагничивающимися телами [1, 3, 5, 8, 12, 16, 17]:

– в нормальном к изначально плоской свободной поверхности жидкости магнитном поле при достижении некоторого критического значения поля  $H_{кр1}$  трансформация свободной поверхности жидкости происходит скачкообразно с образованием пиков локальной неустойчивости над телом и с дальнейшим появлением развитой поверхностной неустойчивости на остальной поверхности жидкости при некотором критическом значении магнитного поля  $H_{кр2}$ .

– в тангенциальном поле экспериментально установлено существование критического значения напряженности магнитного поля  $H_{кр1}^*$ , при котором происходит скачкообразный разрыв слоя магнитной жидкости с образованием над намагничивающимися телами воздушного канала. В диапазоне полей от 8 до 22 кА/м и толщин слоя жидкости от 0,7 до 1,6 радиуса намагничивающихся тел имеет место гистерезис формы свободной поверхности магнитной жидкости, при котором смыкание воздушного канала над телами происходит в поле  $H_{кр2}^*$  меньшего значения критического поля  $H_{кр1}^*$ , в котором данный канал образуется.

3. Теоретически показано, что в условиях невесомости характер формирования объема магнитной жидкости вокруг постоянного цилиндрического магнита определяется геометрическим соотношением его размеров  $h/R$ . Теоретически и экспериментально показана, возможность изменения геометрических размеров капли магнитной жидкости, сформированной вокруг постоянного магнита, путем наложения внешнего магнитного поля [26].

4. На основе комбинированного источника магнитного поля разработан магнитожидкостный инерционный элемент позволяющий реализовать управление его упруго-демпфирующими характеристиками путем изменения поля комбинированного магнита [2, 4, 11, 13, 14].

5. Теоретически исследовано деформирование капли магнитной жидкости, сформированной вокруг комбинированного магнита, двумя плоскопараллельными твердыми немагнитными пластинами. Получены критериальные зависимости силы упругости, возникающей при деформации такой капли, от расстояния между поверхностью магнита и деформирующей пластиной, при соотношении полувысоты магнита к его радиусу в диапазоне от  $1/6$  до  $2$  для объемов жидкости, не превышающих  $2$ -х объемов магнита. Теоретически и экспериментально показано, что изменение магнитного поля комбинированного магнита приводит к изменению сил упругости. Причем увеличение магнитного поля комбинированного магнита в характерной точке может приводить как к увеличению, так и к уменьшению силы упругости, действующей на деформирующую поверхность со стороны жидкости. Характер изменения силы упругости определяется изменением магнитного давления в жидкости и изменением площади касания капли и деформирующей поверхности. При заданной геометрии системы магнит – магнитная жидкость, а также магнитных свойств жидкости характер изменения силы упругости зависит от положения плоскости давления относительно поверхности магнита, а также от величины изменения магнитного поля [13].

6. Экспериментально установлено, что изменение силы упругости, вызванное изменением магнитного поля комбинированного магнита, приводит к изменению положения сформированной вокруг него капли магнитной жидкости в канале клиновидной формы. Показано, что при изменении магнитного поля комбинированного магнита происходит изменение коэффициента упругости и собственной частоты колебаний капли в симметричной клиновидной полости [2, 4, 11, 14].

7. Представлен макетный образец адаптивного магнитожидкостного динамического гасителя колебаний. Экспериментально показана возможность управления упруго-демпфирующими характеристиками такого устройства путем электромагнитного воздействия [6, 7, 9, 19, 20, 21, 28, 29].

8. Экспериментально установлено, что изменение напряженности магнитного поля комбинированного магнита от  $41,4$  до  $100,9$  кА/м приводит к уменьшению относительного времени релаксации демпфируемого объекта до  $47\%$  при начальной амплитуде колебаний объекта до  $5$  мм. Управляющее воздействие не оказывает значительного влияния на относительное время релаксации, если в процессе колебаний происходит деформация боковой поверхности капли [6, 9, 19, 21, 27].

## Рекомендации по практическому использованию

Методика синтеза магнитных жидкостей, предложенная в работе, может быть использована для производства магнитных жидкостей на основе керосина, минеральных и силиконовых масел, пригодных для использования в технических устройствах и обладающих высокой устойчивостью к воздействию сильно неоднородных магнитных полей.

Предложенные конструкции адаптивного магнитожидкостного инерционного элемента и динамического гасителя колебаний могут служить основой при разработке конструкций управляемых магнитожидкостных виброзащитных опор и гасителей колебаний. Представленные в работе критериальные зависимости, характеризующие упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитом, позволяют определять коэффициент упругости, а также величину его изменения магнитным полем в широком диапазоне геометрических и магнитных параметров магнитной системы и могут быть использованы для разработки и оптимизации конструкций адаптивных инерционных элементов опор и гасителей колебаний, конструируемых под конкретные технические параметры. Результаты работы были использованы в НПО им. С. А. Лавочкина при теоретических расчетах и проектировании магнитожидкостного динамического гасителя колебаний.

Результаты работы могут быть использованы в качестве учебных материалов технических университетов при изучении вопросов виброизоляции и виброзащиты технических устройств и внедрены в учебный процесс Белорусского национального технического университета.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи в рецензируемых журналах

1. Bashtovoi, V. Free surface of magnetic fluid with a spherical ferromagnetic body in uniform magnetic field / V. Bashtovoi, A. Motsar, V. Naletova, A. Reks, D. Pelevina // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – V. 49, No. 3-4. – P. 592-595.

2. Bashtovoi, V. Statics of magnetic fluid drop with compound magnetic core in a wedge-shared channel / V. Bashtovoi, S. Klimovich, A. Motsar, A. Reks, P. Ryapolov, A. Storozhenko, I. Shabanova // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2013. – V. 5, No 4. – P. 04012 (4 pp).

3. Pelevina, D. Magnetic fluid with a spherical ferromagnetic body in a uniform magnetic field. Theory and experiment / D. Pelevina, V. Naletova, V. Bashtovoi, A. Motsar, A. Reks // *Magneto hydrodynamics*. – 2014. – V. 50, No. 1. – P. 83-90.

4. Баштовой, В.Г. Упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, А.Г. Рекс // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2014. - № 4. – с. 39-43

5. Баштовой, В.Г. Форма поверхности магнитной жидкости над намагничивающимся шаром в однородном магнитном поле / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, В.А. Налетова, А.Г. Рекс // *Журнал технической физики*. – 2015. – том 85, вып. 10. – с. 23-28.

6. Bashtovoi, V. Energy dissipation in a finite volume of magnetic fluid / V. Bashtovoi, A. Motsar, A. Reks // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2017. – V. 431. – P. 245-248.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

7. Моцар, А.А. Исследование диссипации энергии в магнитной жидкости и разработка виброзащитных устройств / А.А. Моцар, В.Г. Баштовой, С.В. Климович // материалы 66-й студенческой научно-технической конференции БНТУ ФТУГ Минск, 2010 г. / БНТУ – Минск, 2010. – С. 135 – 137

8. Баштовой, В.Г. Форма поверхности магнитной жидкости с ферромагнитным сферическим телом в однородном магнитном поле / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, В.А. Налетова, А.Г. Рекс // *Информационная безопасность: философские, правовые, этические, психологические, институциональные, технологические аспекты деятельности: материалы междунар.научно-практ. конф., Минск, 2012 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – с. 259-261.*

9. Баштовой, В.Г. Магнитожидкостный динамический гаситель колебаний / В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, С.В. Климович, А.А. Моцар // *Информационная безопасность: философские, правовые, этические, психологические, институциональные, технологические аспекты деятельности: материалы междунар.научно-практ. конф., Минск, 2012 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – с. 257-259.*

10. Сулоева, Л.В. Синтез магнитных жидкостей методом эмульгирования / Л.В. Сулоева, В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс А.А. Моцар, П.П. Кужир // *Информационная безопасность: философские, правовые, этические, психологические, институциональные, технологические аспекты деятельности: материалы междунар.научно-практ. конф., Минск, 2012 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – с. 247-248.*

11. Баштовой, В.Г. Исследование статики инерционных магнитожидкостных элементов в клиновидном канале / В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, С.В. Климович, А.А. Моцар // Инженерные, экономико-правовые и гуманитарные вопросы энергетики и охраны окружающей среды: материалы семинара «Энергетика и охрана окружающей среды, Минск, 2012 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – с. 76-79.

12. Bashtovoi, V. Free surface of magnetic fluid with spherical ferromagnetic body in uniform magnetic field / V. Bashtovoi, A. Motsar, V. Naletova, A. Reks // 13 th International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts. – New Delhi, India, 2013. – P. 443-445.

13. Баштовой, В.Г. Экспериментальное исследование упругих свойств капли магнитной жидкости с магнитным ядром / В.Г. Баштовой, С.В. Климович, А.А. Моцар, А.Г. Рекс // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем: сб. науч. тр. IV-й Всерос. научн. конф., г. Ставрополь, 2013 г. / Сев.-Кавк. фед. ун-т. – Ставрополь, 2013 – с. 8-13.

14. Баштовой, В.Г. Статика капли магнитной жидкости с магнитным ядром в канале клиновидной формы / В.Г. Баштовой, С.В. Климович, А.А. Моцар, А.Г. Рекс // Физика и технология наноматериалов и структур: сб. научн. статей Международной конференции, г. Курск, 2013 г. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. С. 121-123.

15. Аль-Джаиш, Таха Полупромышленная установка синтеза магнитных жидкостей на основе различных дисперсионных сред / Таха Аль-Джаиш, А.А. Моцар А.Г. Рекс, Л.В. Сулоева // Физика и технология наноматериалов и структур: сб. научн. статей Международной конференции, г. Курск, 2013 г. / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. С. 124-126.

16. Баштовой, В.Г. Форма поверхности магнитной жидкости с ферромагнитным цилиндрическим телом в однородном магнитном поле / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, В.А. Налетова, Д.А. Пелевина, А.Г. Рекс // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах: материалы научно-техн. конф., Минск, 2014 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014 – с. 93-95.

17. Баштовой, В.Г. Форма свободной поверхности магнитной жидкости вокруг намагничивающегося цилиндрического тела во внешнем магнитном поле / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, В.А. Налетова, А.Г. Рекс // материалы 16-й международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, г. Плес, Россия, 2014 г. / Ивановский гос. энергетических ун-т. – Иваново, 2014. – С. 216-220.

18. Лейченок, Н.С. Влияние тепловыделений комбинированного источника магнитного поля на демпфирующие характеристики адаптивного магнитожидкостного гасителя колебаний / Н.С. Лейченок, А.А. Моцар // Информационные технологии в технических и социально-экономических

системах: материалы научно-техн. конф., Минск, 2016 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016 – С. 77-79.

19. Моцар, А.А. Влияние внешних магнитных воздействий на гидродинамику и диссипацию энергии в магнитожидкостном динамическом гасителе колебаний / А.А. Моцар // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах: материалы научно-техн. конф., Минск, 2016 г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016 – С. 79-81.

20. Баштовой, В.Г. Диссипативные свойства капли магнитной жидкости, сформированной вокруг комбинированного магнита / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, А.Г. Рекс // материалы 17-й международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, г. Плес, Россия, 2016 г. / Ивановский гос. энергетических ун-т. – Иваново, 2016. – С. 327-333.

21. Баштовой, В.Г. Управление упруго-демпфирующими характеристиками магнитожидкостного гасителя колебаний / В.Г. Баштовой, А.А. Моцар, А.Г. Рекс / Информационные технологии в технических, правовых, политических и социально-экономических системах: материалы междунар. научно-практ. конф., Минск, 2017г. // Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2017 – С. 68-70.

### **Тезисы докладов на научных конференциях**

22. Климович, С.В. Гашение колебаний маятника магнитожидкостным демпфером / С.В. Климович, А.А. Моцар // Наука – образованию, производству, экономике: тезисы 8-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2010г. / Белор. нац. техн. ун-т. – Т.1.– Минск, 2010. – С. 140.

23. Баштовой, В.Г. Разработка метода эмульгирования для синтеза магнитных жидкостей / В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, Л.В. Сулоева, П.П. Кужир, А.А. Моцар // Наука – образованию, производству, экономике: тезисы 10-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2012 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – Т.1. – С. 156.

24. Баштовой, В.Г. Импульсное магнитожидкостное демпфирующее устройство / В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, С.В. Климович, А.А. Моцар // Наука – образованию, производству, экономике: тезисы 10-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2012 г.: в 2 т. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2012. – Т.1. – С. 153.

25. Сулоева, Л.В. Синтез магнитных жидкостей на различных дисперсионных средах с использованием метода эмульгирования / Л.В. Сулоева, В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, А.А. Моцар, П.П. Кужир // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2014 г.: в 4 т. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – Т.1. – С. 185.

26. Моцар, А.А. Теоретическое исследование формы капли магнитной жидкости вокруг постоянного магнита во внешнем магнитном поле / А.А. Моцар // Наука – образованию, производству, экономике: тезисы 12-й междунар. научн.-технич. конф., Минск, 2014 г.: в 4 т. / Белор. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – Т.1. – С. 171.

27. Bashtovoi, V. Energy dissipation in a finite volume of magnetic fluid / V. Bashtovoi, A. Motsar, A. Reks // 14 th International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts. – Ekaterinburg, Russia, 2016 – p. 97

### **Патенты на изобретение Республики Беларусь**

28. Магнитожидкостный динамический гаситель колебаний: патент ВУ 18250 на изобретение респ. Беларусь МКИ F 16F 15/03, F 16F 7/10 / В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, А.А. Моцар, А.В. Викуленков, О.П. Клишев, Н.А. Маркачев, Д.А. Сельков, В.А. Тихонов, Е.С. Успенский, заявитель Бел.нац.техн.ун-т. – № а20111538, заявл. 17.11.2011, зарегистрирован 25.02.2014.

29. Магнитожидкостный динамический гаситель колебаний: патент ВУ 18419 на изобретение респ. Беларусь МКИ F 16F 15/03, F 16F 7/10 / В.Г. Баштовой, С.В. Климович, А.А. Моцар, А.Г. Рекс, Л.В. Сулоева, А.В. Викуленков, О.П. Клишев, Н.А. Маркачев, Д.А. Сельков, В.А. Тихонов, Е.С. Успенский, заявитель Бел.нац.техн.ун-т. – № а20111764, заявл. 19.12.2011, зарегистрирован 09.04.2014.

30. Способ получения магнитной жидкости: патент ВУ № 18260 на изобретение респ. Беларусь МКИ F 16F 15/03, F 16F 7/10 / Л.В. Сулоева, В.Г. Баштовой, А.Г. Рекс, А.А. Моцар, П.П. Кужир, заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а20120314, заявл. 02.03.2012, зарегистрирован 25.02.2014.



Моцар Аляксандр Аляксандравіч

**Пругка-дысіпатыўныя працэсы ў абмежаваных аб'ёмах магнітнай вадкасці пры ўздзеянні магнітных палёў у дачыненні да магнітавадкастных вібрахоўных прылад**

**Ключавыя словы:** магнітная вадкасць свабодная паверхня, кропля магнітнай вадкасці, камбінаваны магніт, адаптыўны інерцыйны элемент, магнітавадкастны дынамічны гасільнік ваганняў.

**Аб'ект даследавання:** абмежаваныя аб'ёмы магнітнай вадкасці са свабоднай паверхняй з унутранымі крыніцамі магнітнага поля.

**Прадмет даследавання:** фарміраванне паверхні магнітнай вадкасці вакол магнітных і намагнічаных у знешнім поле целаў, пругкія і дысіпатыўныя працэсы ў абмежаваных аб'ёмах магнітнай вадкасці з унутранай крыніцай магнітнага поля.

**Мэта даследавання:** усталяваць заканамернасці ўплыву магнітнага поля на пругкія і дэмпфіруючыя характарыстыкі абмежаваных аб'ёмаў магнітнай вадкасці з унутранай крыніцай магнітнага поля ў дачыненні да распрацоўцы кіраваных магнітавадкастных вібрахоўных прылад.

**Метады даследавання:** вывучэнне дысіпатыўных працэсаў у магнітавадкастным вібрахоўным гасільніку ваганняў выканана на вібраметрычным стэндзе, які складаецца з крыніцы вібрацыі – працяглай бэлькі і вымяральнага комплексу, заснаванага на выкарыстанні акселерометра KB-12.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** удасканалена методика сінтэзу магнітных вадкасцяў. Эксперыментальна паказана скачкападобная змена формы паверхні магнітнай вадкасці над намагнічанымі ў знешнім аднастайным магнітным полі цэламі сферычнай і цыліндрычнай формы. Эксперыментальна ўстаноўлена наяўнасць гістэрэзісу формы свабоднай паверхні над такімі цэламі ў поле тангенцыйнага напрамку. Распрацаваны новы адаптыўны інерцыйны магнітавадкастны вібрахоўны элемент, які ўяўляе сабой кроплю магнітнай вадкасці, сфарміраваную вакол камбінаванага магніту, які складаецца з пастаяннага магніта і электрамагніта з стрыжнем. Тэарэтычна і эксперыментальна паказана магчымасць кіравання пругкімі і дэмпфіруючымі характарыстыкамі такога элемента шляхам змены магнітнага поля камбінаванага магніту.

**Галіна выкарыстання:** вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы і аптымізацыі канструкцый адаптыўных магнітавадкастных апор і дынамічных гасільнікаў ваганняў, якія выкарыстоўваюцца ў авія- і касмічнай тэхніцы.

## РЕЗЮМЕ

Моцар Александр Александрович

**Упруго-диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости при воздействии магнитных полей применительно к магнитожидкостным виброзащитным устройствам**

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, свободная поверхность, капля магнитной жидкости, комбинированный магнит, адаптивный инерционный элемент, магнитожидкостный динамический гаситель колебаний.

**Объект исследования:** ограниченные объемы магнитной жидкости со свободной поверхностью с внутренними источниками магнитного поля

**Предмет исследования:** формирование поверхности магнитной жидкости вокруг магнитных и намагничивающихся во внешнем поле тел, упругие и диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля

**Цель исследования:** установить закономерности влияния магнитного поля на упругие и демпфирующие характеристики ограниченных объемов магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля применительно к разработке управляемых магнитожидкостных виброзащитных устройств.

**Методы исследования:** изучение диссипативных процессов в магнитожидкостном гасителе колебаний выполнено на виброметрическом стенде состоящем из источника вибраций – протяженной балки и измерительного комплекса основанного на использовании акселерометра КВ-12.

**Полученные результаты и их новизна:** усовершенствована методика синтеза магнитных жидкостей. Экспериментально показано скачкообразное изменение формы поверхности магнитной жидкости над намагничивающимися во внешнем однородном магнитном поле телами сферической и цилиндрической формы. Экспериментально установлено наличие гистерезиса формы свободной поверхности над такими телами в поле тангенциального направления. Разработан новый адаптивный инерционный магнитожидкостных виброзащитный элемент, представляющий собой каплю магнитной жидкости, сформированную вокруг комбинированного магнита, состоящего из постоянного магнита и электромагнита с сердечником. Теоретически и экспериментально показана возможность управления упругими и демпфирующими характеристиками такого элемента путем изменения магнитного поля комбинированного магнита.

**Область применения:** результаты исследований могут быть использованы при разработке и оптимизации конструкций адаптивных магнитожидкостных опор и динамических гасителей колебаний, используемых в авиа- и космической технике.

## SUMMARY

**Motsar Aliksandr Aliksandravich**

### **Elastic and energy dissipation processes in finite volumes of magnetic fluid under the influence of magnetic fields with regard to magnetic fluid vibroprotective devices**

**Keywords:** magnetic fluid, free surface, magnetic fluid drop, a compound magnet, adaptive inertia mass, magnetic fluid dynamic absorber

**The object of research:** finite volumes of magnetic fluid with free surface which is formed around internal sources of magnetic field.

**Subject of research:** surface formation of magnetic fluid around magnetic and magnetizable in external magnetic field bodies, elastic and dissipative processes in finite volumes of magnetic fluid with internal source of magnetic field.

**Purpose of research:** to establish regularities of magnetic field influence on elastic and damping properties of finite volume of magnetic fluid which is formed around internal magnetic field source with regard to development of controlled magnetic fluid vibroprotective devices.

**Research methods:** investigation of energy dissipation processes in the magnetic fluid absorber was carried out on vibrometric test bench comprised of vibration source – long elastic beam and measuring complex based on the accelerometer KB-12.

**The results obtained and their novelty:** The method of magnetic fluid synthesis is enhanced. It is experimentally shown that the abrupt change of magnetic fluid free surface may take place above magnetizable spherical and cylindrical bodies in the uniform magnetic field. The hysteresis of magnetic fluid surface above such bodies was obtained experimentally in tangential magnetic field. New adaptive magnetic fluid vibroprotective inertia element is presented. Such element consists of magnetic fluid drop formed around compound magnet which is made of permanent magnet and electromagnet with plunger. The possibilities to control elastic and damping properties of new element by means of compound magnet field change are shown theoretically and experimentally.

**Field of application:** obtained results are valuable for the design development and optimization of adaptive magnetic fluid dampers and dynamic absorbers which are used in aircraft and space technology.

Научное издание

**МОЦАР**  
**Александр Александрович**

**УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ  
ВИБРОЗАЩИТНЫМ УСТРОЙСТВАМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Подписано в печать 20.12.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 100. Заказ 1091.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.