

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



Нестеров Сергей Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ
ПОРШНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДЕМПФЕРОВ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**Диссертация на соискание
учёной степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук
Казаков Ю.Б.

Иваново 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ ДЕМПФЕРЫ	10
1.1. Вибрационная защита объектов электромеханическими магнитожидкостными демпферами	10
1.2. Использование магнитовязкостных свойств магнитной жидкости для создания демпферов с регулируемой жёсткостью	14
1.3. Взаимное влияние электромагнитных, гидродинамических, тепловых и механических полей при преобразовании энергии в электромеханических магнитожидкостных устройствах	17
1.4. Конструкции электромеханических магнитожидкостных демпферов	20
1.5. Выводы и постановка задачи исследования	27
2. АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ДЕМПФЕРА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	29
2.1. Постановка задачи напорного течения магнитной жидкости в щелевом канале	29
2.2. Ламинарное течение магнитной жидкости в щелевом канале демпфера с поперечным магнитным полем	31
2.3. Алгоритм расчёта силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера	38
2.4. Расчёт силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера на основе решения уравнений ламинарного течения магнитной жидкости в магнитном поле	40
2.5. Выводы.....	46

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ МАГНИТОЖИТКОСТНЫХ ДЕМПФЕРОВ С УЧЁТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	47
3.1. Моделирование электромеханических магнитождкостных демпферов с учётом взаимного влияния физических полей	47
3.2. Описание модели, граничные и начальные условия	49
3.3. Результаты математического исследования взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов.....	60
3.4. Выводы.....	69
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИТКОСТНОГО ДЕМПФЕРА.....	70
4.1. Пути совершенствования электромеханических магнитождкостных демпферов.....	70
4.2. Эффект магнитной пружины в электромеханических устройствах с магнитной жидкостью.....	71
4.3. Разработка установки для экспериментального исследования электромеханических магнитождкостных демпферов	73
4.4. Параметры магнитореологической суспензии, использованной при экспериментальных исследованиях электромеханических магнитождкостных демпферов.....	81
4.5. Электромеханический магнитождкостный демпфер с немагнитным поршнем.....	83
4.6. Электромеханический магнитождкостный демпфер с ферромагнитными элементами на поршне.....	90
4.7. Силовые характеристики электромеханического магнитождкостного демфера	98
4.8 Совершенствование конструкций электромеханического магнитождкостного демпфера.....	101

4.9. Выводы.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
Список литературы	111
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	119
Приложение 1. Материалы экспериментальных исследований	120
Приложение 2. Результаты интеллектуальной деятельности	135
Приложение 3. Акты внедрения	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Вибрации работающего оборудования негативно влияют на надёжность установок, здоровье персонала и др. Наиболее энергоёмкими гасителями вибраций являются гидравлические демпферы, в которых потоки рабочей жидкости распределяют энергию колебаний, преобразованную в энергию вязкостной диссипации, по объёму демпфера. Недостатком гидравлических демпферов является сложность управления их силой сопротивления.

Перспективны электромеханические магнитожидкостные демпферы (ЭМЖД) с магнитными жидкостями (МЖ) или магнитореологическими суспензиями (МРС). В них можно электромагнитным воздействием (изменением магнитной индукции) менять вязкость МЖ (более, чем на порядок) и силу сопротивления демпфера, перестраивать амплитудно-частотную характеристику, управлять процессом гашения колебания. Для усиления магнитореологического эффекта применяются МЖ с большой долей магнитных частиц с нелинейной магнитной характеристикой и повышенным напряжением начального сдвига. ЭМЖД находят применение в подвесках транспортных средств, сейсмозащите зданий и вантовых мостов, средствах гашения колебаний трубопроводов, в протезировании суставов и др.

При работе ЭМЖД имеют место взаимовлияющие электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы. Вязкость МЖ нелинейно зависит от индукции, температуры, скорости сдвига. На силу сопротивления демпфера дополнительно влияют начальное напряжение сдвига, профиль скорости течения МЖ в канале демпфера при воздействии внешнего магнитного поля. В этой связи актуально исследование взаимосвязанных магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД. Актуальность темы подтверждает предоставленный РФФИ грант № 12-08-97516-р_центр_а «Разработка научных основ создания управляемых демпфирующих устройств

с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей», выполненный в рамках научного направления в ИГЭУ.

Цель диссертационной работы — повышение точности прогнозирования силовых характеристик и эффективности применения электромеханических магнитожидкостных демпферов.

Предмет исследования: взаимосвязанные электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы в ЭМЖД.

Объект исследования: поршневой электромеханический магнитожидкостный демпфер.

Задачи исследования:

1. Анализ электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД при диссипации энергии колебаний.
2. Разработка математических моделей ЭМЖД с учётом влияния феррогидродинамических и тепловых процессов на вязкость и реологические свойства МЖ, силу сопротивления демпфера.
3. Разработка методик расчета характеристик ЭМЖД на основе использования взаимосвязанных моделей физических полей.
4. Расчетные исследования магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД.
5. Совершенствование конструкций ЭМЖД с возможностью регулирования силовой характеристики путём изменения вязкости и других параметров МЖ электромагнитным способом.
6. Разработка опытного стенда и экспериментальные исследования свойств и характеристик ЭМЖД.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием общей теории электромеханического преобразования энергии, математических методов моделирования электромагнитных, феррогидродинамических и тепловых процессов, численных методов расчетов физических полей на основе метода конечных элементов. Экспериментальные исследования выполнены на сертифицированном оборудовании с

использованием методов физического моделирования и натурного эксперимента.

Научная новизна. Получены новые научные результаты:

- математические модели ЭМЖД, отличающиеся учетом влияния магнитной индукции и температуры, нелинейности магнитореологических характеристик, напряжения начального сдвига, профиля скорости течения МЖ в канале демпфера при воздействии внешнего магнитного поля на силу сопротивления демпфера;
- методики расчетов магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД, отличающиеся учетом их взаимного влияния;
- алгоритмы и программы расчетов силовых характеристик и энергии диссипации в ЭМЖД, реализованные на основе анализа взаимосвязанных физических полей.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные математические модели, алгоритмы и программы расчета ЭМЖД, полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют определять уточненные силовые характеристики и энергию диссипации демпферов.
2. Созданный стенд позволяет проводить автоматизированные экспериментальные исследования с изменяемыми электромагнитным способом феррогидродинамическими и силовыми характеристиками ЭМЖД.
3. На основе результатов исследований разработаны улучшенные патентозащищенные конструкции поршневых управляемых магнитожидкостных амортизаторов, позволяющих изменять силу сопротивления амортизатора регулированием магнитного потока.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели ЭМЖД с учетом влияния на силу сопротивления демпфера магнитной индукции и температуры, нелинейности магнитореологических характеристик, начального напряжения сдвига,

профиля скорости течения магнитной жидкости в канале демпфера при воздействии внешнего магнитного поля.

2. Методики, алгоритмы и программы расчетов магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД, силовых характеристик, на основе анализа взаимосвязанных физических полей.

3. Результаты уточненных аналитических, расчетных и экспериментальных исследований свойств и характеристик ЭМЖД.

Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности – «Научная специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых ... устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии.»; в части области исследования – пункту 1: «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования ... электромеханических преобразователей и электрических аппаратов»; пункту 3: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии»; пункту 5: «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование ... электромеханических преобразователей и электрических аппаратов ...»; так как посвящена повышению эффективности электромеханических магнитожидкостных демпферов на основе совершенствования конструкции, разработки и использования уточненных расчетных моделей с учётом взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений, использованием современных математических моделей и лицензионного программного обеспечения. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами, хорошим совпадением экспериментальных результатов с результатами теоретических расчетов.

Апробация работы:

Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: «Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям» (Плес, ИГЭУ, 2012, 2014, 2016, 2018 гг.), «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» (Ставрополь, СКФУ, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.), «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2011, 2013, 2015, 2017 гг.), «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Суздаль, 2012 г.), «Электромеханика, Электротехнологии, электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ)» (Алушта, 2012 г.), «Энергия инновации» (Иваново, ИГЭУ, 2012, 2013, 2015 гг.), «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014» (Екатеринбург, УрФУ, 2014 г.) «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2016 г.), «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2016 г.), «Russian Conference on Magneto Hydrodynamics» (Пермь, Институт механики сплошных сред, 2015 г.), «International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-14)» (Екатеринбург, 2016 г.).

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты использованы при разработке ЭМЖД для прецизионного сварочного оборудования в НПЦ «СплавТест», в учебном процессе ИГЭУ по дисциплинам профиля «Электромеханика».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в журнале, входящем в базы Web of Science и Scopus, 4 результата интеллектуальной деятельности, 18 работ в других российских и зарубежных изданиях.

1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ ДЕМПФЕРЫ

1.1. Вибрационная защита объектов электромеханическими магнитожидкоственными демпферами

ЭМЖД все чаще активно применяются в системах управляемого гашения вибраций, например, в системах подвески транспортных средств [22, 33, 42], сейсмозащиты зданий и вантовых мостов [5, 12, 49], протезах конечностей [7, 20] (рисунок 1.1). Быстрорастущий спрос на ЭМЖД стал причиной широкого изучения проблем проектирования, анализа, моделирования и управления систем с ЭМЖД. В значительной мере современное состояние этого направления изложено в публикациях, посвящённых обзору магнитожидкоственных технологий и применению МЖ в системах демпфирования [1, 44, 45, 50], моделированию МЖ и ЭМЖД [15], стратегии управления системой с ЭМЖД [68].

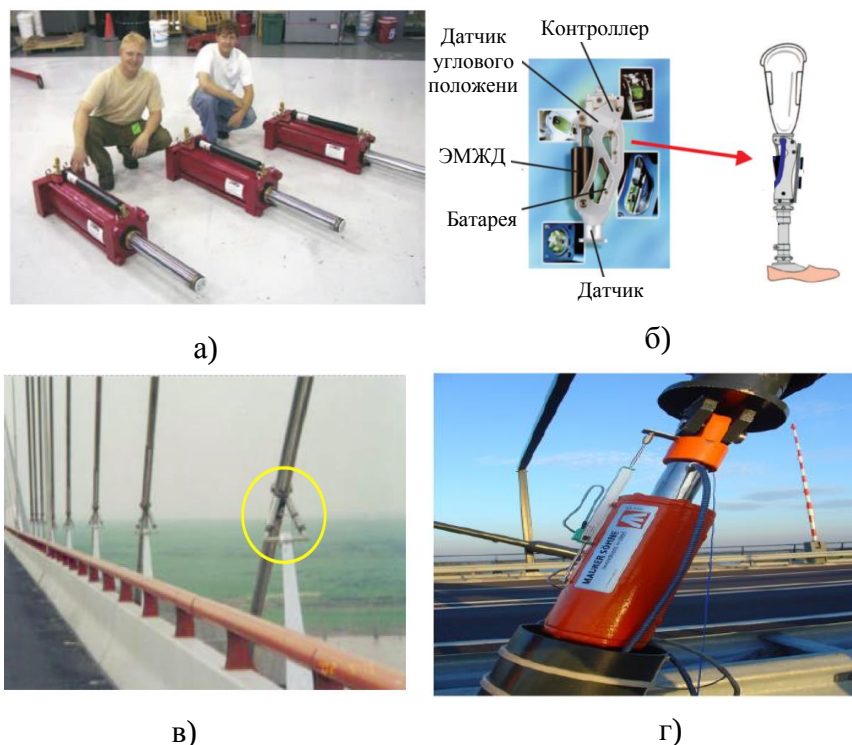


Рисунок 1.1 Примеры применения ЭМЖД: а – ЭМЖД для гашения колебаний зданий и сооружений [5]; б – протез, основанный на ЭМЖД [18]; в – мост в Китае с ЭМЖД [12]; г – датчик перемещений и ЭМЖД на мосту в Голландии [38]

Одним из показателей интенсивности развития какого-либо технического направления служит объем публикуемой патентной информации. Чем больше предлагается новых технических решений, вариантов конструктивного исполнения устройства, тем больше вероятность их практической реализации в реальных промышленных установках. Патентная информация из доступных источников показывает постоянный рост интереса к ЭМЖД. В последние годы наблюдается особенно интенсивный поток патентной информации по ЭМЖД (рисунок 1.2).

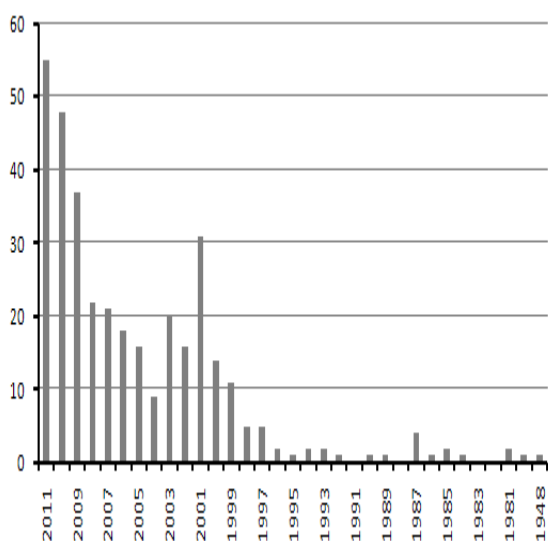


Рисунок 1.2. Распределение патентной информации о ЭМЖД по годам согласно европейской патентной системе

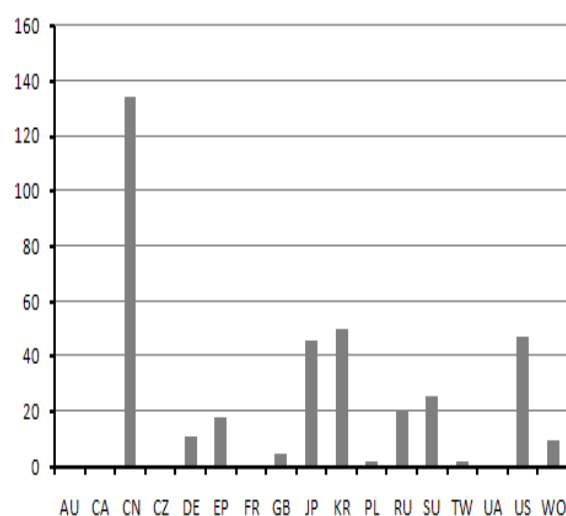


Рисунок 1.3. Распределение патентной информации о ЭМЖД по странам согласно европейской патентной системе

Из рисунка 1.3 видно, что наибольшее количество зарегистрированных патентов приходится на Китай (CN), Японию (JP), Южную Корею (KR) и США (US). Более половины всех патентов приходятся на страны Юго-Восточной Азии (Китай, Япония, Южная Корея). Совместное количество патентов СССР (SU) и Российской Федерации (RU) не превышает 50. Для российских патентов характерна констатация одного-двух заявляемых свойств, что создаёт условия лёгкого обхода формулы изобретения и затрудняет применение патентуемого материала в реальных устройствах.

Также следует отметить высокую публикационную активность, посвящённую ЭМЖД. На диаграммах рисунка 1.4 представлены количество публикаций (рисунок 1.4, а) и цитирований (рисунок 1.4, б) в поисковой

платформе Web of Science по запросу «magnetorheological fluid damper» за период с 1998 по начало 2017 года. Из данных на диаграммах можно сделать вывод о всё возрастающем интересе к ЭМЖД со стороны мирового научного сообщества.

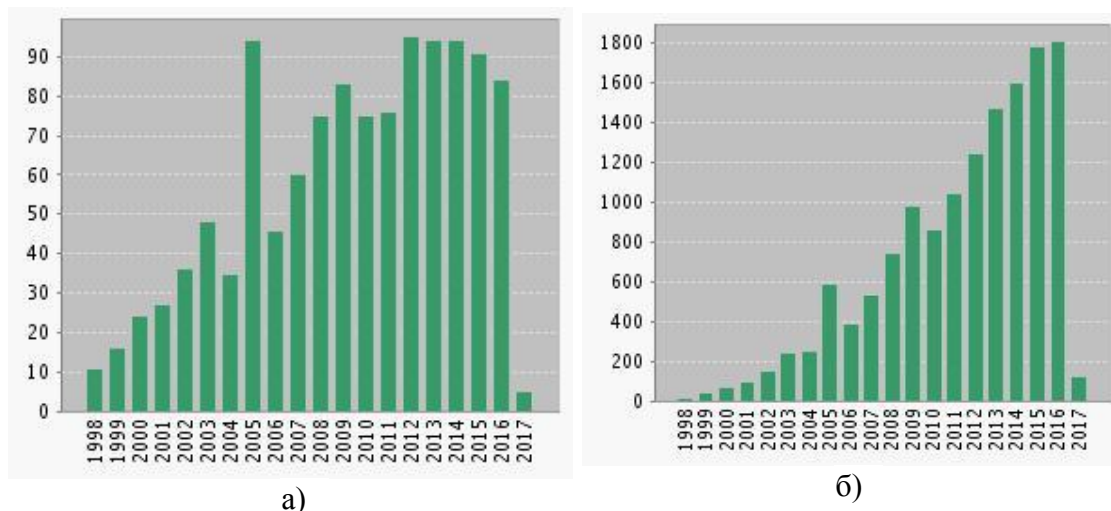


Рисунок 1.4 Количество публикаций (а) и цитирований (б) в поисковой платформе Web of Science по запросу «magnetorheological fluid damper»

Основы применения МЖ в устройствах рассмотрены в трудах отечественных (Д.В. Орлова, Б.А. Гордеева, З.П. Бибика, Д.Ю. Борина, В.П. Михайлова и др.) и иностранных (Ш. Оденбаха, Р. Розенцвейга, М.И. Шлиомиса, Е.Е. Шульмана и др.) ученых. В работах И.П. Копылова, Б.Л. Алиевского, А.Ю. Коняева описаны специальные электромеханические устройства с использованием МЖ. Электротехническая система виброзащиты с магнитореологическим демпфером рассматривалась в работах А.М. Абакумова, Д.Г. Рандина. В работах Ю.Б. Казакова, Ф.Н. Сарапулова, В.Э. Фризена рассмотрены вопросы анализа электромеханических устройств с учетом взаимного влияния физических процессов. Однако сведения о моделировании ЭМЖД с учётом взаимного влияния магнитного, гидродинамического и теплового полей в настоящее время в литературе отсутствуют.

Применение ЭМЖД является основным направлением развития на рынке интеллектуальных автомобильных подвесок [4, 8, 18]. Продолжается развитие

полуактивной системы подвески Magne-Ride™ с комбинацией стоек на основе ЭМЖД и амортизаторов, разработанных Delphi Automotive Systems и Cadillac. Материалы, поставляемые Lord Corporation, и системы магнитоуправляемой подвески Magne-Ride™, используют производители автомобилей, например, General Motors [35, 37, 41]. Магнитожидкостные управляемые амортизаторы впервые появились в моделях 2002 Cadillac Seville STS и 2003 Chevrolet Corvette, а затем получили развитие в других моделях Cadillac, Chevrolet, Audi, Ferrari и Etcetera (рисунок 1.5) [48]. Преимуществами использования системы Magne-Ride™ являются значительное уменьшение количества механических частей, в основном клапанов, и возможность адаптации к изменению уровня ударов и вибраций с частотой до 500 с^{-1} . [35]

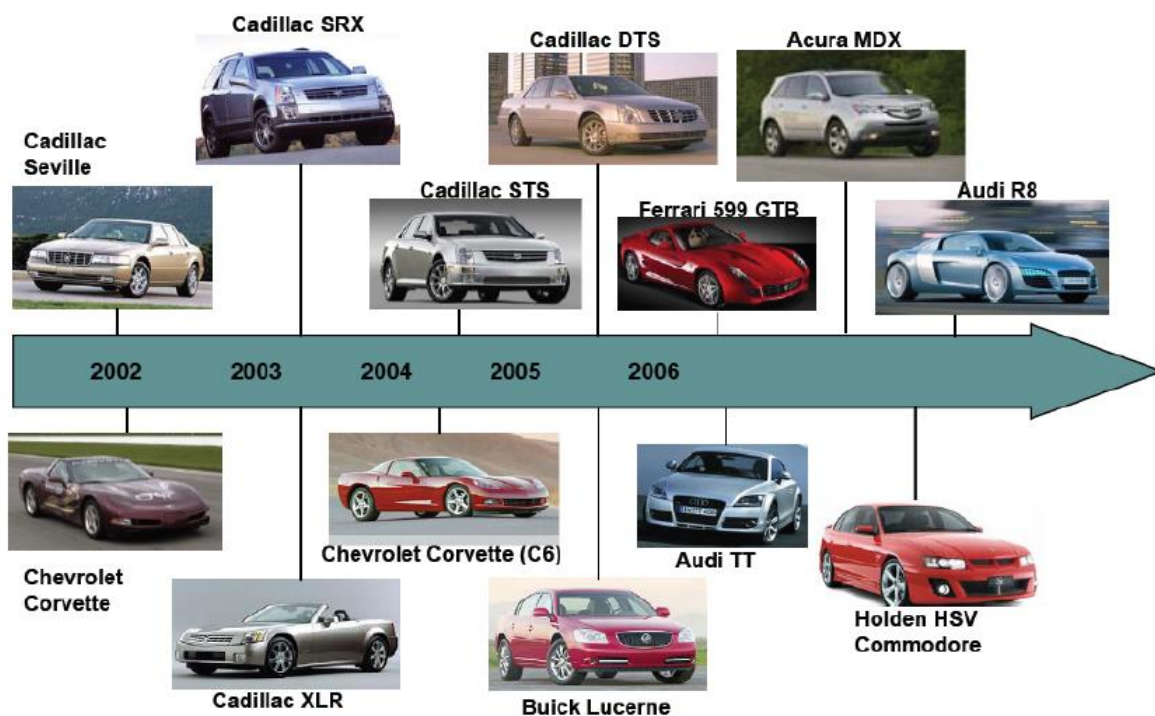


Рисунок 1.5. Применение ЭМЖД в автомобильных подвесках [48]

ЭМЖД эффективны при применении в активных и полуактивных системах гашения вибраций благодаря преимуществам, присущим магнитожидкостной технологии: бесконтактному и тихому управлению свойствами жидкости без движущихся механических частей и механизмов, способности развивать большие усилия, большому диапазону регулировки

силовой характеристики, высокой устойчивости к примесям и загрязнениям, простому интерфейсу связи между электронным блоком управления и механическим устройством, малому времени отклика и низкому энергопотреблению [11, 28, 55, 57, 72, 85].

1.2. Использование магнитовязкостных свойств магнитной жидкости для создания демпферов с регулируемой жёсткостью

Магнитная жидкость, коллоидный раствор ферромагнетика в жидкой среде, представляет собой трёхфазную коллоидную систему, состоящую из твердой ферромагнитной фазы, поверхностно-активного вещества (ПАВ) и жидкости-носителя (рисунок 1.6). В МЖ текучесть сочетается со значительной намагниченностью и седиментационной устойчивостью в гравитационных и градиентных магнитных полях. Гидравлические свойства МЖ зависят от свойств жидкости-носителя и концентрации твёрдой фазы, а магнитные свойства от материала твердой фазы и её концентрации. [52, 70, 74, 78, 79, 81, 83]

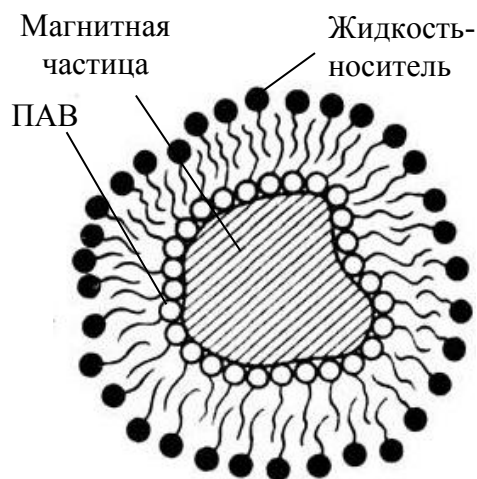


Рисунок 1.6. Ферромагнитная частица, покрытая ПАВ, в жидкости-носителе

При отсутствии внешнего магнитного поля МЖ течет как обычная жидкость, но с приложением магнитного поля начинает проявлять неньютоновские свойства: появляется предел текучести, вязкость меняется с ростом скорости сдвига, при этом характерное время реакции свойств МЖ на изменение напряжённости магнитного поля имеет порядок миллисекунд. Воздействием магнитного поля на реологические свойства МЖ можно реализовать быстрое и простое взаимодействие между электронной системой управления и механическими системами.

В магнитном поле МЖ структурируются, в них образуются агрегаты, сохраняющиеся даже при течении с малыми скоростями сдвига слоёв среды. При наличии агрегатов МЖ начинает вести себя как псевдопластичное тело с эффективной вязкостью $\eta_{\text{эф}}$. С ростом скорости сдвига слоёв МЖ агрегаты и остатки структуры среды постепенно разрушаются, и в итоге реологическая характеристика таких сред становится линейной.

Различают МЖ, содержащие наноразмерные магнитные частицы (средний диаметр частиц порядка 10 нм) и магнитореологические суспензии (МРС) с частицами микронных размеров. [86] В демпфирующих устройствах наибольшее распространение получили МРС, так как нанодисперсная МЖ не обеспечивает требуемого диапазона изменения реологических свойств. Многие физические эффекты и математический аппарат описания свойств для нанодисперсных МЖ и МРС схожи, поэтому в дальнейшем изложении акцентировать внимание на размере магнитной фазы будем только там, где различия в свойствах, обусловленные размером частиц являются важными для понимания сущности какого-либо явления, во всех остальных случаях будет использована аббревиатура МЖ.

Типичная МРС содержит 20-40% объёмных частей частиц карбонильного железа [32, 34, 40], суспендированных в жидкости-носителе с добавлением поверхностно-активных веществ. Предел текучести МРС зависит от квадрата намагниченности насыщения частиц. Лучшими из доступных частиц являются сплавы железа и кобальта с величиной магнитной индукции насыщения около 2,4 Тл [6]. Однако такие сплавы дороги для большинства практических применений, и наибольшее распространение получили частицы чистого железа с магнитной индукцией насыщения 2,15 Тл. Практически все остальные металлы, сплавы и оксиды имеют намагниченность насыщения значительно ниже, чем у железа, в результате чего свойства МРС, получаемых на их основе, существенно хуже.

В МРС диаметр частиц составляет, как правило, 3-5 мкм. С увеличением размера возрастает сложность суспендирования частиц в жидкости [6], более мелкие частицы легче поддерживать во взвешенном состоянии, но труднее изготовить [26].

При воздействии магнитного поля МЖ обладает неньютоновскими реологическими свойствами, которые тем сильнее отличаются от реологических свойств ньютоновской жидкости, чем меньше скорость сдвига $\dot{\gamma}$, больше концентрация магнитных частиц ϕ и выше индукция внешнего магнитного поля $\bar{B}$, в котором происходит течение МЖ.

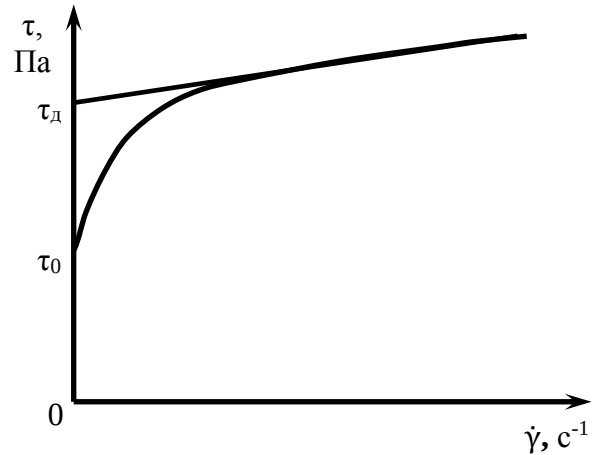


Рисунок 1.7. Реологическая кривая псевдопластичного тела

Примерный вид реологической кривой МЖ показан на рисунке 1.7. Начальное напряжение сдвига τ_0 и динамическая вязкость η увеличиваются с ростом концентрации магнитных частиц ϕ и магнитной индукции поля $\bar{B}$, усиливающими взаимодействие магнитных частиц, и уменьшаются с ростом температуры среды. Под начальным напряжением сдвига τ_0 понимают усилие, которое необходимо приложить к жидкости для начала течения.

Для анализа работы ЭМЖД в квазистатическом режиме делают допущения о полностью развитом течении и для описания реологических свойств МЖ используют вязкопластическую модель Гершеля-Балкли [3, 15]

$$\tau = \left(\tau_d(H) + K \cdot |\dot{\gamma}|^{\frac{1}{m}} \right) \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}), \quad (1.1)$$

где τ_d – динамический (кажущийся) предел текучести; H – напряжённость приложенного магнитного поля; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; m , K – параметры жидкости, $m > 0$, $K > 0$. При $m = 1$ модель Гершеля-Балкли переходит в вязкопластичную модель Бингама.

Таким образом, применение МЖ, обладающей магнитовязким эффектом, в демпферах позволяет создавать устройства с регулируемой жёсткостью. Для расширения диапазона регулирования в ЭМЖД наибольшее распространение получило применение МРС, а не нанодисперсной МЖ. Однако в ответственных устройствах, долгое время находящихся в состоянии покоя, оправданно применение нанодисперсной МЖ, имеющую гораздо большую устойчивость и коллоидную стабильность. Также следует отметить значительное повышение коллоидной стабильности у многокомпонентных МРС, содержащих частицы как микронного, так и нанометрового размеров [23, 24, 25]. Большой диапазон изменения вязкости и высокая стабильность делает двухкомпонентные МЖ оптимальными рабочими средами ЭМЖД.

1.3. Взаимное влияние электромагнитных, гидродинамических, тепловых и механических полей при преобразовании энергии в электромеханических магнитожидкостных устройствах

В процессе работы электромеханических магнитожидкостных устройств (ЭМУ) имеют место разнообразные физические явления. В ЭМУ могут одновременно взаимодействовать и преобразовываться потоки электрической, тепловой и механической энергии. Электромагнитные, тепловые, гидродинамические и механические процессы в ЭМУ существуют и взаимодействуют одновременно. «Именно совместное проявление взаимосвязанных физических процессов — электромагнитных, тепловых, силовых — формирует в итоге рабочие свойства электромеханического преобразователя и определяет их функциональную пригодность» [58]. Только углубленное исследование всех процессов в их взаимосвязи позволяет на стадии разработки ЭМУ точнее прогнозировать и формировать его параметры.

При движении МЖ внутри нее вследствие вязкого трения выделяется тепло, что приводит к повышению температуры. Такие параметры МЖ, как

магнитная проницаемость, теплопроводность и вязкость зависят от её температуры и величины приложенного магнитного поля. [21, 47].

В ЭМУ, объём которых не полностью заполнен МЖ, под действием электромагнитных, механических усилий и тепловых воздействий возникает деформация конфигурации МЖ, что приводит к значительному перераспределению электромагнитного поля [77].

Приложение внешнего магнитного поля, выстраивает вдоль его силовых линий ферромагнитные частицы, что приводит к возникновению предела текучести у МЖ. Однако, повышение температуры вызывает рост тепловой энергии частиц. Это уменьшает ориентированность магнитных моментов частиц по внешнему полю [65]. Температурная зависимость предела текучести для МЖ приведена на рисунке 1.8 [21]. Видно, что при повышении температуры МЖ с 25 до 70 °С предел текучести жидкости уменьшается практически в два раза.

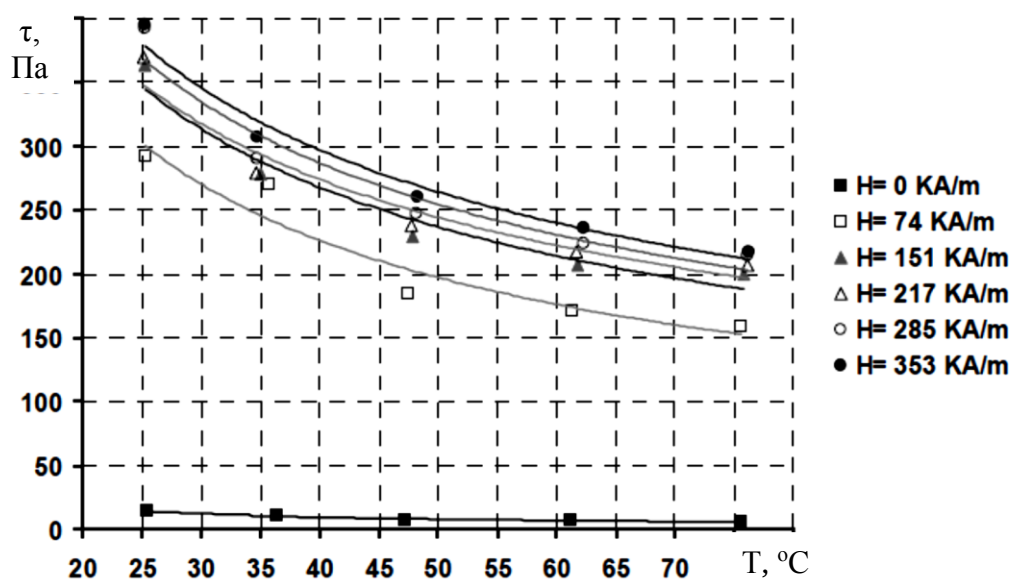


Рисунок 1.8. Зависимость предела текучести магнитореологической суспензии от температуры и напряжённости магнитного поля [21]

В МЖ, находящейся в магнитном поле возникает эффект терромагнитной конвекции, заключающийся в том, что менее нагретые объёмы МЖ, которые обладают большей намагниченностью, стремятся в области с большой магнитной индукцией. Это увеличивает теплоотдачу от ЭМУ по сравнению с

немагнитным теплоносителем. Так же теплопроводность МЖ, в направлении линий магнитной индукции увеличивается на 15 %

Вязкость МЖ с наноразмерными магнитными частицами при наложении внешней магнитной индукции в 0,35 Тл возрастает до 3 раз по сравнению с вязкостью в отсутствии магнитного поля. [65].

Зависимость касательного напряжения сдвига от скорости сдвига для МРС при изменении скорости сдвига от 0,001 до 1000 с⁻¹ и индукции магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 0,55 Тл, при температуре 20 °С показаны на рисунке 1.9. Видна ярко выраженная зависимость напряжения сдвига МРС от индукции магнитного поля и скорости сдвига в жидкости.

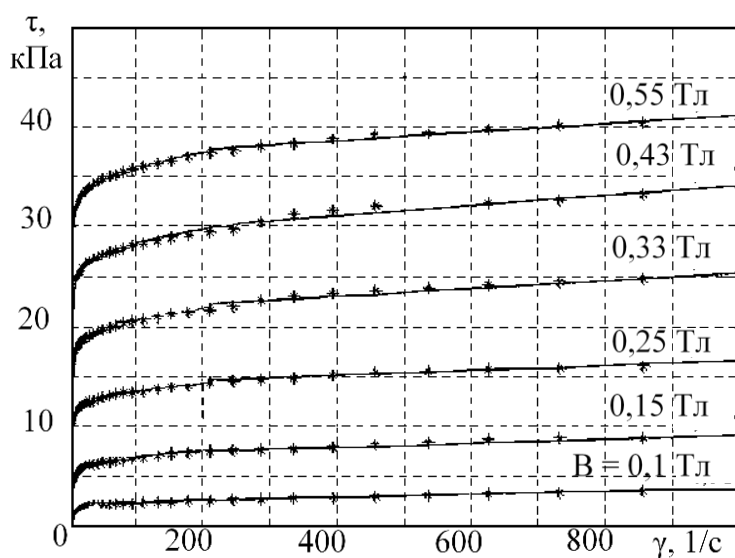


Рисунок 1.9. Экспериментальные реологические характеристики МЖ при разных индукциях [20]

Таким образом, принимая во внимание сложность происходящих в жидкости процессов, при анализе работы ЭМЖД необходимо учитывать взаимное влияние электромагнитных, гидродинамических, тепловых и механических полей. Пренебрежение и отказ от учёта ряда факторов может внести заметную погрешность в результаты моделирования и сделать модель непригодной для практического применения.

1.4. Конструкции электромеханических магнитожидкостных демпферов

Все конструкции демпферов с использованием МЖ в качестве рабочего тела можно разделить на инерционные демпферы, в которых отсутствует жёсткая связь корпуса и колеблющейся массы, и системы, в которых оба узла жёстко связаны с колеблющимися друг относительно друга объектами. Различают также прямоходовые демпферы, в которых подвижный узел двигается возвратно-поступательно, и радиальные демпферы, предназначенные для гашения крутильных колебаний.

На рисунке 1.10 показаны основные варианты прямоходовых ЭМЖД, которые состоят из корпуса, поршня, катушки намагничивания, позволяющей управлять силой сопротивления демпфера, и системы каналов для перетекания МЖ. Преобразование энергии колебания в тепловую в таких ЭМЖД происходит при перетекании МЖ по дроссельным каналам под действием давления, создаваемого движением поршня. Используя возможность изменения вязкости МЖ магнитным полем в сочетании с системами механического регулирования, применяющимися в гидравлических амортизаторах с традиционными рабочими средами, можно создать демпфер со сложной зависимостью силы сопротивления от скорости перемещения поршня. Тепло, выделяющееся при гашении колебаний, эффективно отводится от самых нагретых участков благодаря тому, что жидкость при движении поршня активно перемешивается. Это повышает стабильность силовых характеристик ЭМЖД при продолжительной работе.

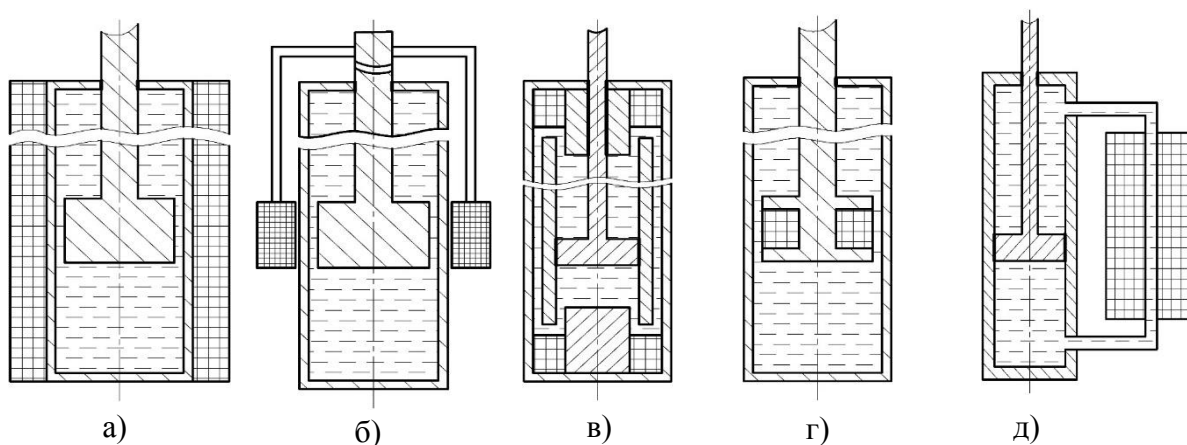


Рисунок 1.10. Варианты конструктивного исполнения прямоходового ЭМЖД:

а – катушка управления распределена вдоль всего корпуса; б – катушка управления сконцентрирована, размещена снаружи корпуса и перемещается согласованно с поршнем; в – катушка управления размещена внутри корпуса; г – катушка управления размещена в поршне д – магнитная система вынесена за пределы корпуса

Прямоходовые ЭМЖД, наряду с перечисленными выше преимуществами, имеют и недостатки. Вследствие возвратно-поступательного движения поршня и больших давлений, возникающих в демпфере при гашении колебаний, возникают сложности с герметизацией рабочей области и предотвращения выброса МЖ по штоку. При движении поршня в уплотнительных, нагнетательных и центрирующих кольцах действуют большие фрикционные усилия, которые дополнительно увеличиваются, если магнитное поле замыкается через корпус и поршень, выполненные из магнитного материала.

С точки зрения создания требуемого магнитного потока и условий размещения магнитной системы возможно несколько конструктивных исполнений ЭМЖД. Размещение катушки управления вдоль корпуса демпфера (рисунок 1.10,а) упрощает её изготовление, улучшает температурные условия её работы, позволяет создать большую магнитодвижущую силу (МДС). Недостатками является увеличение габаритов системы, необходимость защиты катушки управления от механических внешних воздействий, низкая магнитная проводимость на пути прохождения

магнитного поля. Учитывая все факторы, данную конструкцию нельзя назвать рациональной.

Вариантом предыдущей конструкции можно считать устройство с катушкой управления, расположенной снаружи корпуса демпфера на участке расположения поршня, передвигающейся вслед за поршнем при его движении (рисунок 1.10,б). Вынос катушки управления за пределы демпфера улучшает температурные условия её работы. Магнитное поле создаётся только в области протекания МЖ, что позволяет создать значительные локальные напряжённости магнитного поля для интенсивного воздействия на МЖ. Недостатками данной конструкции являются дополнительные конструктивные узлы для крепления катушки управления и её связи с перемещающимся поршнем, увеличение диаметрального размера демпфера, большое падение магнитного потенциала при прохождении магнитным полем немагнитного корпуса, силы одностороннего магнитного тяжения, возникающие между катушкой и поршнем.

Существуют конструкции, в которых катушка управления размещена внутри корпуса демпфера и создаёт магнитное поле лишь в области дроссельных каналов, через которые поршень прогоняет МЖ (рисунок 1.10,в). Малая протяжённость участков с низкой магнитной проводимостью и короткий путь замыкания магнитных силовых линий делает этот вариант исполнения демпфера достаточно удачным с точки зрения условий прохождения магнитного потока. Расположение катушки управления внутри демпфера накладывает ограничение на её размеры, значение создаваемой МДС и негативно сказывается на охлаждении.

В большой группе прямоходовых демпфирующих устройств катушка управления размещена в поршне (рисунок 1.10,г). Система получается компактной, магнитное поле воздействует на МЖ только в области максимального рассеивания энергии, поэтому такое конструктивное исполнение демпфера достаточно широко распространено. Из недостатков можно выделить ограниченный размер катушки управления, быстрое

насыщение центральной части поршня, достаточно плохие температурные условия работы катушки управления.

Особое место занимают конструкции прямоходовых магнитожидкостных демпфирующих устройств, в которых управляющее магнитное поле воздействует на МЖ в размещённой за пределами корпуса демпфера внешней магнитной системе (рисунок 1.10, д). Под давлением движущегося поршня МЖ протекает через вынесенные за пределы корпуса трубки, соединяющие надпоршневое и подпоршневое пространства с узлом, в котором магнитное поле воздействует на МЖ. Несмотря на значительное увеличение габаритов демпфера и усложнение всей конструкции, такое конструктивное решение позволяет создавать большие индукции в областях протекания МЖ, каналы большой протяжённости и сложной конфигурации, что расширяет диапазон изменения силовой характеристики амортизатора.

В ЭМЖД, предназначенных для гашения крутильных колебаний, варианты исполнения которых показаны на рисунке 1.11, в отличие от прямоходовых демпфирующих устройств, нельзя получить сложную силовую характеристику введением в конструкцию амортизатора дополнительных клапанов и зазоров. При вращающемся роторе характеристика однотипна и зависит только от значения магнитного поля.

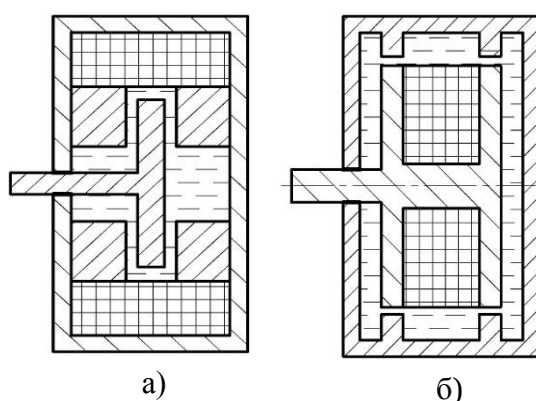


Рисунок 1.11. Варианты исполнения радиального ЭМЖД: а – катушка управления размещена на корпусе; б – катушка управления размещена на роторе

В радиальных демпферах, поскольку движение только вращательное, условия для герметизации рабочей зоны лучше, чем в прямоходовых ЭМЖД.

Наличие опор вращения обеспечивает равномерность зазора и компенсирует все вредные силовые эффекты, возникающие при работе амортизатора.

В инерционных ЭМЖД (рисунок 1.12) отсутствует жёсткая связь корпуса и колеблющейся инерционной массы.

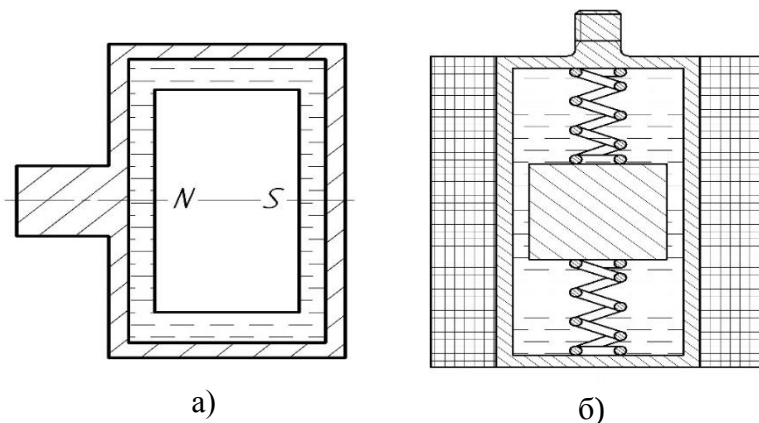


Рисунок 1.12. Инерционные ЭМЖД: а – роторный, б – прямоходовой

Инерционная масса подвешена в МЖ, разделяющей магнитопроводящие и немагнитные поверхности, за счёт возникающей в ней опорной силы. [78] Гашение колебаний в роторных (рисунок 1.12, а) и прямоходовых (рисунок 1.12, б) инерционных ЭМЖД происходит за счёт разности скоростей инерционной массы и корпуса, возникающей при резких изменениях скорости движения последнего. При равномерном движении инерционная масса с корпусом двигаются с одинаковой скоростью и диссипации энергии не происходит. Инерционные демпферы плохо гасят вибрации с малой скоростью сдвига вибрирующего элемента, так как при этом смещение инерционной массы относительно корпуса малы или вообще отсутствуют. Корпус инерционного демпфера можно выполнить герметичным, так как в нём отсутствует механическая связь колеблющегося объекта и инерционной массы.

На основе анализа конструктивных исполнений ЭМЖД предложен возможный вариант их классификации, показанный в виде структурной схемы на рисунке 1.13. За основу представленной классификации взяты конструктивные признаки, характерные именно для электромеханических устройств с МЖ, поэтому признаки, относящиеся к механическим качествам,

оказались на нижних иерархических уровнях предлагаемой системы классификации.

Значительное влияние на процессы в ЭМЖД оказывают магнитные свойства материала корпуса и поршня. Если одно из тел немагнитное и отделено от другого тела МЖ в градиентном магнитном поле, создаётся опорный эффект, позволяющий подвижным элементам самоцентрироваться в осесимметричных устройствах, и появляется возможность создания ЭМЖД с самоцентрированием.



Рисунок 1.13. Классификация демпфирующих устройств на основе магнитной жидкости

С корпусом и поршнем из магнитопроводящего материала вследствие возникающей силы одностороннего магнитного тяжения невозможно создать демпфер с эффектом самоцентрирования. Организация движения жидкости через внешнюю магнитную систему (рисунок 1.10,д) снимает всякие ограничения, накладываемые на материал поршня и корпуса. В общем случае может быть четыре комбинации материалов поршня и корпуса демпфирующего устройства.

Катушка управления, создающая магнитное поле, может размещаться как внутри, так и снаружи корпуса. Если материал корпуса магнитный, то исключаются все способы с созданием магнитного потока катушкой управления, размещённой вне корпуса (рисунок 1.10, *а, б*), так как из-за замыкания магнитного поля через корпус управляющего воздействия на МЖ не будет. При магнитопроводящем материале корпуса катушки управления должны располагаться внутри корпуса (рисунок 1.10, *в, г*).

Катушки управления внутри корпуса могут крепиться к корпусу или к поршню, что отражено в следующем уровне классификации.

Под инерционным демпфером понимают демпфер без жёсткой связи колеблющейся массы с источником колебаний (рисунок 1.12). Демпфером с присоединённой массой называют демпфер с жесткой связью поршня и корпуса с колеблющимися друг относительно друга объектами.

Кроме того, следует различать прямоходовые и радиальные демпферы. В радиальных устройствах подвижный элемент вращается относительно статора (полнооборотные устройства) или поворачивается на некоторый угол менее 360° (поворотные устройства). В радиальных демпферах ротор не смещается в осевом направлении.

Несмотря на всё многообразие предложенных конструкций, невозможно выделить ЭМЖД, максимально отвечающий всем требованиям, предъявляемым к данному типу устройств. В связи с этим актуально совершенствование конструкций ЭМЖД и поиск новых технических решений.

Результаты, представленные в данном подразделе, опубликованы в соавторстве в работе. [67]

1.5. Выводы и постановка задачи исследования

1. ЭМЖД эффективны при применении в активных и полуактивных системах гашения вибраций благодаря преимуществам, присущим магнитожидкостной технологии: бесконтактному и бесшумному управлению свойствами жидкости без движущихся механических частей и механизмов, способности развивать большие усилия, большому диапазону регулирования силовой характеристики, высокой устойчивости к примесям и загрязнениям, простому интерфейсу связи между электронным блоком управления и механическим устройством, быстрому отклику на управляющее воздействие и низкому энергопотреблению.

2. Аналитические модели, служащие для описания работы демпфера, основаны на предположении о полностью развитом течении МЖ и не учитывают нелинейности реологических характеристик, напряжение начального сдвига, профиль скорости течения МЖ в канале демпфера. Очевидно, что при анализе работы ЭМЖД необходимо использовать уточненные модели ЭМЖД.

3. Моделирование ЭМЖД затруднено существенным взаимным влиянием магнитных, гидродинамических и тепловых процессов при вязкостной диссипации энергии колебаний в тепловую энергию при воздействии магнитного поля. Для корректного анализа свойств демпферов необходим взаимосвязанный учет магнитных, гидродинамических и тепловых явлений.

4. Несмотря на всё многообразие предложенных конструкций ЭМЖД, силовую характеристику демпфера регулируют только изменением вязкостных свойств МЖ.

Сделанные выводы позволяют сформулировать **цель диссертации**: повышение точности прогнозирования силовых характеристик и эффективности применения электромеханических магнитожидкостных демпферов.

Поставленная цель требует решения следующих **основных задач**:

1. Анализ электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД при диссипации энергии колебаний.
2. Разработка математических моделей ЭМЖД с учётом влияния феррогидродинамических и тепловых процессов на вязкость и реологические свойства МЖ, силу сопротивления и жесткость демпфера.
3. Разработка методов расчета характеристик ЭМЖД на основе использования взаимосвязанных моделей физических полей.
4. Расчетные исследования магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД.
5. Совершенствование конструкций ЭМЖД с возможностью регулировки силовой характеристики изменением вязкости и других параметров МЖ электромагнитным способом.
6. Разработка опытного стенда и экспериментальные исследования свойств и характеристик ЭМЖД.

Для решения поставленных задач целесообразно применение общей теории электромеханического преобразования энергии, математических методов моделирования электромагнитных, феррогидродинамических и тепловых процессов, численных методов расчетов физических полей на основе метода конечных элементов, экспериментальных исследований с использованием методов физического моделирования и натурного эксперимента.

2. АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ДЕМПФЕРА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

2.1. Постановка задачи напорного течения магнитной жидкости в щелевом канале

При проектировании новых устройств часто возникает необходимость в простой и эффективной оценке их рабочих свойств. Важным рабочим свойством демпфирующего устройства является силовая характеристика — зависимость силы сопротивления демпфера от скорости перемещения штока.

В демпферах без МЖ гашение колебаний происходит при протекании жидкости через дроссельные отверстия в штоке [56]. В ЭМЖД использование дроссельных отверстий малого диаметра малоприменимо, так как получаемая при этом скорость сдвига МЖ велика, изменение вязкости невелико, что сводит на нет все усилия по регулировке. Наибольший эффект при регулировании силовой характеристики ЭМЖД достигается при воздействии магнитным полем на большой объём медленно текущей жидкости. Так как ЭМЖД появились и начали активно исследоваться сравнительно недавно, а методики определения рабочих свойств для демпферов на классических жидкостях оказались малоприменимы для ЭМЖД, актуальна разработка упрощенной методики предварительной оценки свойств ЭМЖД.

В изученных источниках отмечается ламинарный характер течения МЖ в зазоре ЭМЖД. Это связано с достаточно большой вязкостью используемых МЖ и стабилизирующим влиянием на течение внешнего магнитного поля [36, 85].

Следует отметить решения из [3, 9, 13, 16, 69], основанные на представлении МЖ как тела, описываемого вязкопластичной моделью Бингама или Гершеля-Балкли. Недостаток таких подходов состоит в

игнорировании начального участка реологической кривой МЖ, что при малых скоростях сдвига МЖ в зазоре дает неверные результаты.

Подход, основанный на аппроксимации сложной реологической кривой МЖ несколькими линейными участками, как предполагается, даст лучшие результаты при малых скоростях сдвига в МЖ. При этом в профиле скорости течения МЖ в канале можно выделить области с постоянной вязкостью, характерной для каждого линеаризованного участка.

Основной сложностью аппроксимации нелинейной реологической кривой линейными участками является нахождение зон перехода от течения с большей вязкостью к течению с меньшей вязкостью.

При движении поршня в цилиндрическом корпусе (рисунок 2.1) МЖ течёт в зазоре между поршнем и корпусом [54, 83].

Рассмотрим напорное течение МЖ в щелевом канале при внешнем магнитном поле, вектор напряжённости $\vec{H}$ которого перпендикулярен направлению течения среды. Точное решение уравнений движения вязкой жидкости в большинстве случаев невозможно. Считаем зазор между поршнем и корпусом малым по отношению к диаметру поршня и пренебрегаем его кривизной [84].

При решении системы уравнений Навье–Стокса принимаем следующие допущения:

- пренебрегаем действием внешних массовых сил (в данном случае силой тяжести);
- отбрасываем все члены уравнений с азимутальной составляющей φ и v_φ , так как течение осесимметрично;
- считаем радиальную составляющую скорости v_r много меньшей осевой составляющей v_z вследствие малой величины зазора;

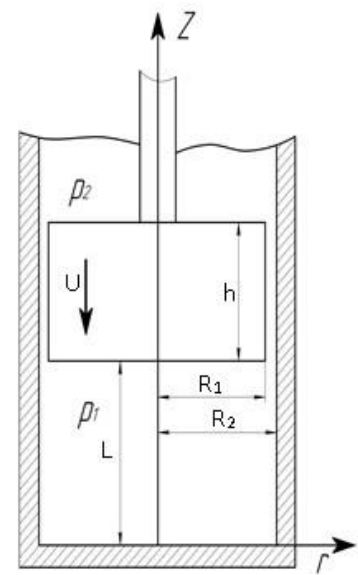


Рисунок 2.1. К решению задачи движения поршня в цилиндре с вязкой жидкостью

— считаем изменение осевой составляющей скорости в направлении оси z значительно более медленным, чем в направлении оси r ($dv_z/dz \ll dv_z/dr$) вследствие прилипания жидкости к стенкам.

2.2. Ламинарное течение магнитной жидкости в щелевом канале демпфера с поперечным магнитным полем

Известно, что профиль скорости напорного течения ньютоновской жидкости в плоском канале имеет параболический вид, показанный на рисунке 2.2.

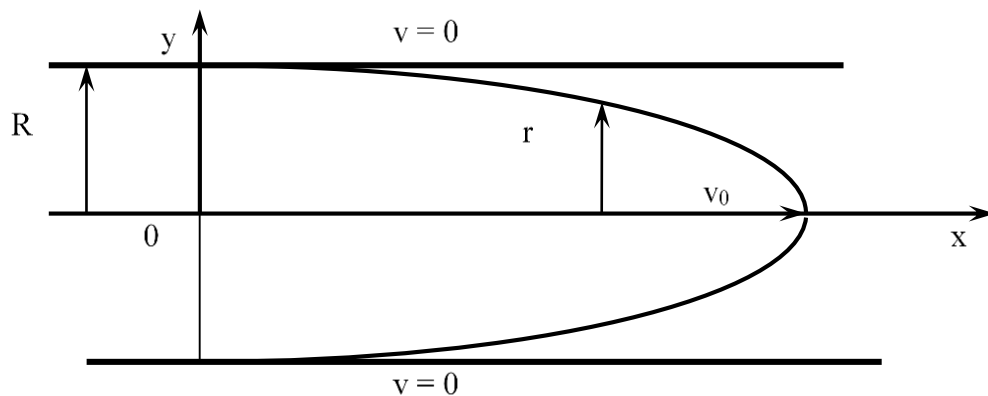


Рисунок 2.2. Поле скоростей вязкой жидкости в щелевом зазоре

При перепаде давления Δp , длине щелевого канала L , вязкости жидкости η и толщине щели $2R$ для текущего значения координаты r скорость течения определяется по формуле

$$v = \frac{\Delta p}{L 2\eta} (R^2 - r^2) \quad (2.1)$$

Обозначим градиент давления в щелевом канале как $C = \Delta p/L$. Тогда поле скоростей изменяется по параболической кривой

$$v = \frac{C}{2\eta} (R^2 - r^2) \quad (2.2)$$

а максимальная скорость v_0 на оси щелевого канала

$$v_0 = \frac{C}{2\eta} R^2 \quad (2.3)$$

При течении МЖ в магнитном поле происходит её структурирование и реологическая кривая, т.е., зависимость касательного напряжения τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ слоёв жидкости, имеет вид, показанный на рисунке 2.3.

В первом приближении весь диапазон течения можно разбить на две области: первая — от нуля до $\dot{\gamma}_{12}$ с усреднённой вязкостью η_1 ; вторая — от $\dot{\gamma}_{12}$ и далее с вязкостью η_2 . В первой области после преодоления силы сдвига слоёв, которая определяется начальным касательным напряжением τ_0 , происходит разрушение элементов

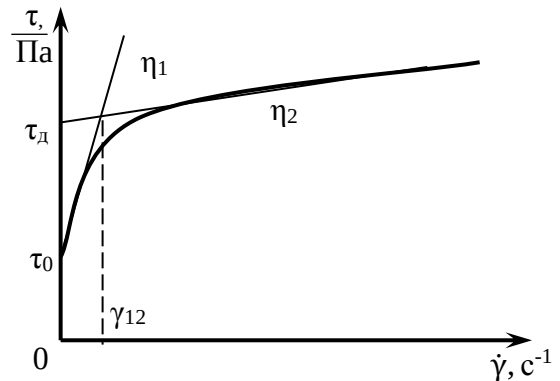


Рисунок 2.3. Реологическая кривая МЖ при воздействии магнитного поля

структуры МЖ, образованной во внешнем магнитном поле до начала движения жидкости. Наличие крупных цепочечных структур, агрегатов, которые взаимодействуют с магнитным полем и тормозятся им, вызывает увеличение динамической вязкости текущей среды. Приблизительно можно считать в этой области динамическую вязкость постоянной и равной η_1 .

Во второй области, при значительных скоростях сдвига слоёв жидкости, когда энергия гидродинамического сдвигового течения больше энергии диполь-дипольного взаимодействия, все агрегаты разрушаются и даже действие внешнего магнитного поля не удерживает их от разрушения. Тогда для напряжений сдвига в этих областях при течении МЖ имеем:

$$\tau = \tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma} \quad \text{и} \quad \tau = \tau_d + \eta_2 \dot{\gamma}; \quad (2.4)$$

откуда для граничного значения скорости сдвига из равенства

$$\tau_0 + \eta_1 \dot{\gamma}_{12} = \tau_d + \eta_2 \dot{\gamma}_{12},$$

получаем

$$\dot{\gamma}_{12} = \frac{\tau_d - \tau_0}{\eta_1 - \eta_2} . \quad (2.5)$$

Из формулы (2.2), описывающей поле скоростей течения МЖ, найдём производную скорости по высоте щели

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = -\frac{C}{\eta} r . \quad (2.6)$$

Известно, что $\tau = \eta \dot{\gamma}$, следовательно, начальное напряжение сдвига τ_0 определится градиентом сдвига текущей среды, которое будет достигнуто на координате r_0 :

$$\tau_0 = \eta_1 \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=r_0} = \eta_1 \frac{C}{\eta_1} r_0 ; \quad \text{или} \quad \tau_0 = C \cdot r_0 . \quad (2.7)$$

Отсюда следует, что в области течения с малыми градиентами сдвига, ограниченной в щелевом течении размером r_0 от центральной линии, скорость течения будет одинаковой. Из формулы (2.7) получаем

$$r_0 = \frac{\tau_0}{C} = \frac{\tau_0 L}{\Delta p} . \quad (2.8)$$

Рассмотрим течение в щелевом канале жидкости, в которой динамическая вязкость имеет разные значения, которые, однако, не меняются в некоторых пределах изменения скорости сдвига. Профиль скорости такого течения, когда динамическая вязкость жидкости может иметь два значения, соответствующих реологической кривой изображённой тонкими линиями на рисунке 2.3, показаны на рисунке 2.4.

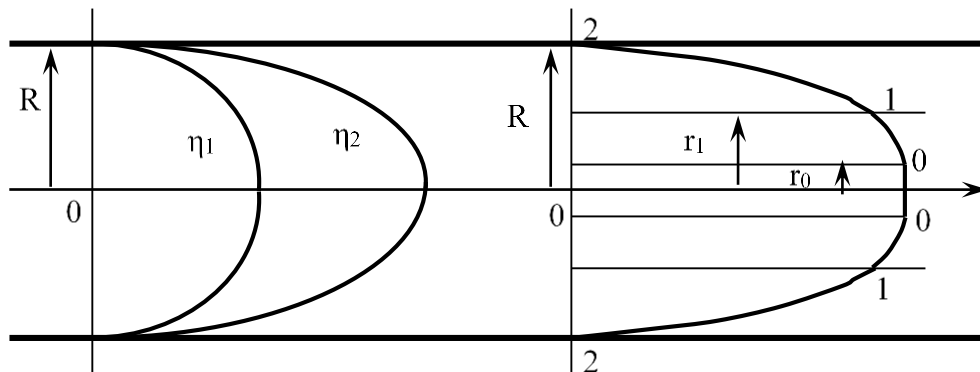


Рисунок 2.4. Схема течения жидкости с изменяющейся динамической вязкостью

На участке 0-0 скорость течения постоянна, образуется стержневое тело течения. Это связано с малыми значениями градиента скорости, которые не могут разрушить структуры, образованные диполь-дипольным магнитным взаимодействием частиц в коллоидной системе и усиленные внешним магнитным полем.

На участке 0-1 по обе стороны от оси течения скорость сдвига слоёв мала. Поле скоростей определяется большой динамической вязкостью η_1 , которая соответствует наличию в жидкости значительного количества не разрушенных агрегатов в виде цепочечных или пространственных структур, которые ориентируются внешним магнитным полем. В левой части рисунка показан профиль скорости в канале в случае вязкости η_1 во всех областях течения.

На участке 1-2 по обе стороны от оси течения скорость сдвига велика, практически все агрегаты разрушены и динамическая вязкость η_2 равна вязкости двухфазной коллоидной системы с учётом некоторого тормозящего действия внешнего магнитного поля. На левой части рисунка показан профиль скорости в канале в случае вязкости η_2 во всех областях течения.

Начальная скорость течения на участке 0-1 определяется максимальной скоростью течения жидкости на участке 1-2, а скорость среды на участке 0-0 равна максимальной скорости на участке 0-1.

Размер области с постоянной скоростью течения из-за структурирования среды при малых скоростях сдвига слоёв определён формулой (2.8). Поле скоростей и скорость сдвига относительно ядра течения изменяются до скорости сдвига $\dot{\gamma}_{12}$ согласно формулам (2.2), (2.6).

Приравняв скорость сдвига на этом участке граничному скорости сдвига $\dot{\gamma}_{12}$, согласно формуле (2.5) получим значение радиуса r_1 перехода к течению с меньшей вязкостью η_2 .

$$r_1 = r_0(1+k), \quad \text{где} \quad k = \frac{\frac{\tau_d}{\tau_0} - 1}{1 - \frac{\eta_2}{\eta_1}}. \quad (2.9)$$

Анализ формулы (2.9) показывает, что всегда $k > 0$. Это следует из того, что $\tau_d > \tau_0$ и $\eta_1 > \eta_2$. Следовательно, числитель и знаменатель параметра k больше нуля, $(\tau_d / \tau_0) - 1 > 0$ и $1 - \eta_2 / \eta_1 > 0$, сам параметр больше нуля.

На участке 1-2 профиль скорости течения определяется вязкостью η_2 и может быть рассчитан по формуле (2.2) при изменении текущего параметра r в пределах от R , равного половине толщины щелевого канала, до r_1 — границе течения с вязкостью η_2 и течения с вязкостью η_1 , что соответствует скорости сдвига γ_{12} .

$$v_{12} = \frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r^2); \quad R \geq r \geq r_1. \quad (2.10)$$

На границе участков 1-2 и 0-1 скорость течения определяется по формуле

$$v_1 = \frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2). \quad (2.11)$$

Тогда скорость течения на участке 0-1 определится как

$$v_{01} = \frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1}(r_1^2 - r^2); \quad r_1 \geq r \geq r_0. \quad (2.12)$$

Скорость течения на участке 0-0

$$v_{00} = \frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1}(r_1^2 - r_0^2). \quad (2.13)$$

Одним из основных параметров, характеризующих воздействие магнитного поля на МЖ, текущую в зазоре, является расход, который тем меньше, чем больше тормозящий эффект магнитного поля. Для оценки значений расхода МЖ и влияния на него разных факторов следует определить среднюю скорость течения МЖ в канале. В нашем случае течение МЖ в

щелевом канале имеет три характерные области, в которых следует определить средние скорости и расход среды.

Средняя скорость на каждом отдельном участке течения определяется начальной скоростью течения на рассматриваемом участке, которая равна конечной скорости течения предшествующего участка, и средней скоростью течения на самом участке. Среднее значение скорости течения на произвольном участке с координатами r_i и r_j , при $r_i > r_j$, может быть определено как

$$v_{cp} = \frac{1}{r_i - r_j} \int_{r_j}^{r_i} v_{ij} dr = \frac{1}{r_i - r_j} \int_{r_j}^{r_i} \frac{C}{2\eta_{ij}} (r_i^2 - r^2) dr = \frac{C}{2\eta_{ij}} \frac{1}{r_i - r_j} \left[(r_i^3 - r_i^2 r_j) - \frac{1}{3} (r_i^3 - r_j^3) \right].$$

После преобразований получим

$$v_{cp} = \frac{C \cdot (r_i - r_j) \cdot (2 \cdot r_i + r_j)}{6\eta_{ij}} \quad (2.14)$$

Здесь, как и ранее, $C = \Delta p / L$. Обозначим через η_{ij} динамическую вязкость жидкой среды на участке $i-j$. Если принять конечное значение текущего параметра равным нулю, $r_j = 0$, то получим, что средняя скорость составляет две трети от максимальной скорости течения. Если начальный параметр участка r_i не равен значению R , то средняя скорость на участке $i-j$ определится суммой скоростей:

$$V_{cp} = V_i + V_{cp,ij} \quad (2.15)$$

Для областей рассматриваемого течения на участке 1-2, на котором $r_2 = R$ и $v_2 = 0$, получим

$$v_{12cp} = \frac{C \cdot (R - r_1) \cdot (2 \cdot R + r_1)}{6\eta_2} \quad (2.16)$$

На участке 0-1, на котором $r_0 = \tau_0 / C$, для средней скорости течения получим

$$v_{01cp} = \frac{C}{2\eta_2} (R^2 - r_1^2) + \frac{C \cdot (r_1 - r_0) \cdot (2 \cdot r_1 + r_0)}{6\eta_1} \quad (2.17)$$

На участке 0-0 скорость постоянна и определяется формулой

$$v_{00cp} = \frac{CR^2}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1}(r_1^2 - r_0^2) \quad (2.19)$$

Выражения для средних скоростей течения на участках позволяют определить расход МЖ при течении в поперечном магнитном поле, определяемый суммой расходов в каждой области течения, которые равны произведению средней скорости течения на участке на площадь поперечного сечения этих областей при одинаковой ширине b щелевого канала. На участке 1-2 общая площадь поперечного сечения течения составит $S_{12} = 2b(R - r_1)$, на участке 0-1 — $S_{01} = 2b(r_1 - r_0)$, на участке 0-0 — $S_{00} = 2br_0$. Тогда суммарный расход среды Q_Σ определим по формуле

$$\begin{aligned} Q_\Sigma = & \frac{C \cdot (R - r_1) \cdot (2 \cdot R + r_1)}{6\eta_2} \cdot 2b(R - r_1) + \\ & + \left[\frac{C}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C \cdot (r_1 - r_0) \cdot (2 \cdot r_1 + r_0)}{6\eta_1} \right] \cdot 2b(r_1 - r_0) + \\ & + \left[\frac{CR^2}{2\eta_2}(R^2 - r_1^2) + \frac{C}{2\eta_1}(r_1^2 - r_0^2) \right] \cdot 2br_0. \end{aligned} \quad (2.20)$$

После преобразования окончательно получим

$$Q_\Sigma = \frac{2 \cdot C \cdot b \cdot (R^3 \cdot \eta_1 - r_0^3 \cdot \eta_2 - r_1^3 \cdot \eta_1 + r_1^3 \cdot \eta_2)}{3\eta_1\eta_2} \quad (2.21)$$

При отсутствии внешнего магнитного поля вязкость МЖ определяется только вязкостью коллоида η_0 . Определим расход среды Q_0 без внешнего магнитного поля при ширине канала b

$$Q_0 = \frac{2CR^3b}{3\eta_0} \quad (2.22)$$

В случае развитого течения, при больших значениях скорости сдвига, центральная часть тела потока мала и можно полагать

$$Q_2 = \frac{2CR^3b}{3\eta_2} \quad (2.23)$$

2.3. Алгоритм расчёта силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера

Практически во всех случаях область диссипации энергии в ЭМЖД представляет собой чередующиеся участки с присутствием и отсутствием магнитного поля (полюса и межполюсные пространства). Сложность расчёта силовой характеристики состоит в том, что профиль скорости потока и вязкость жидкости на каждом из участков могут быть различны и определяться свойствами МЖ, но средняя скорость течения и расход жидкости остаются постоянными. Предложенный порядок расчёта силовой характеристики ЭМЖД представлен на рисунке 2.5.

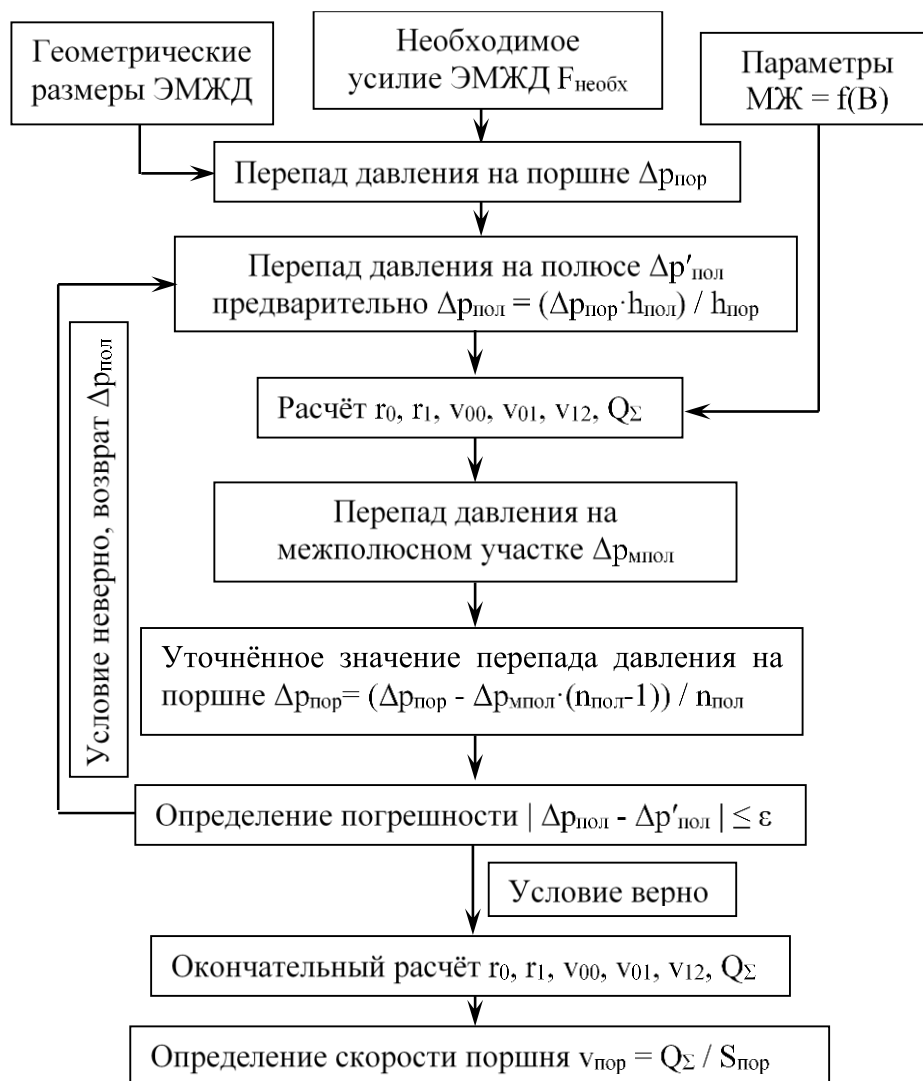


Рисунок 2.5. Алгоритм расчёта силовой характеристики ЭМЖД

Перед началом расчёта необходимо задать геометрические параметры рабочей зоны ЭМЖД, свойства МЖ и необходимую силу сопротивления демпфера. По результатам расчёта получаем скорость движения поршня.

После задания необходимой силы сопротивления ЭМЖД вычисляем перепад давления на поршне, обеспечивающий данную силу сопротивления

$$\Delta p_{\text{необх}} = \frac{F_{\text{необх}}}{S_{\text{пор}}} . \quad (2.24)$$

После проведения итерационного расчёта получаем скорость движения поршня при заданной силе сопротивления демпфера.

На первой итерации, исходя из предположения о равномерном падении напора по длине поршня, находим предварительный перепад давления на полюсе $\Delta p_{\text{пол}}$ как

$$\Delta p_{\text{пол}} = \frac{\Delta p_{\text{необх}} \cdot h_{\text{пол}}}{h_{\text{пор}}} , \quad (2.25)$$

где $h_{\text{пол}}$ — длина полюса, $h_{\text{пор}}$ — длина поршня.

С учётом свойств МЖ по формулам, приведённым ранее в этой главе, определяем r_0 (2.8), r_1 (2.9), v_{12} (2.10), v_{01} (2.12), v_{00} (2.13), Q_{Σ} (2.21).

В межполюсном пространстве магнитный поток отсутствует и МЖ не подвержена воздействию магнитного поля. Её вязкость постоянна и равна вязкости двухфазного коллоида. Зная расход МЖ и учитывая параболический профиль течения, находим перепад давления на межполюсном пространстве

$$\Delta p_{\text{мпол}} = \frac{3 \cdot h_{\text{мпол}} \cdot \eta_0 \cdot Q_{\Sigma}}{2 \cdot R^2 \cdot w} , \quad (2.26)$$

где η_0 — вязкость МЖ в отсутствии магнитного поля, $h_{\text{мпол}}$ — длина межполюсного пространства, w — ширина канала.

Уточнённое значение перепада давления на полюсе

$$\Delta p_{\text{пол}} = \frac{\Delta p_{\text{необх}} - \Delta p_{\text{мпол}} \cdot (n_{\text{пол}} - 1)}{n_{\text{пол}}} . \quad (2.27)$$

Полученное значение сравнивается с принятым ранее, и, если разница меньше заданной величины, то происходит окончательный расчёт параметров r_0 , r_1 , v_{00} , v_{01} , v_{12} , Q_Σ и скорости движения поршня

$$v_{\text{пол}} = \frac{Q_\Sigma}{S_{\text{пор}}} \quad (2.28)$$

Если разница больше заданной величины, то новое значение падения давления на полюсе возвращается в начало цикла и расчёт повторяется.

На основе предложенного алгоритма разработан автоматизированный комплекс расчёта силовой характеристики ЭМЖД и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [82].

2.4. Расчёт силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера на основе решения уравнений ламинарного течения магнитной жидкости в магнитном поле

Использованные для расчёта реологические кривые МРС представлены Гудмундссоном (К.Н. Gudmundsson) в работе [20] и показаны на рисунке 1.9. В качестве магнитной фазы использован порошок карбонильного железа с $d_{\text{ср}} = 2,1$ мкм, жидкостью основой является перфторированный полиэфир с динамической вязкостью $0,3$ Па·с. Динамическая вязкость МРС без воздействия магнитного поля равна $1,02$ Па·с.

По приведённым реологическим кривым получены характерные значения в соответствии с обозначениями рисунка 2.3, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характерные значения реологических кривых МРС

В, Тл	τ_d , кПа	τ_0 , кПа	η_1 , Па с	η_2 , Па с
0,1	2,8	0,7	74,97	1,613
0,15	7	2,2	206,1	2,646
0,25	14,2	6,2	304,29	3,301
0,33	21,4	11,16	380,52	3,856
0,43	29,2	17,8	434,7	4,41
0,55	37	24	497,7	4,977

На основе уравнений (2.10-2.13) получен профиль скорости течения в зазоре ЭМЖД для разных скоростей движения поршня. На рисунке 2.6 приведен профиль скорости течения при величине индукции магнитного поля в канале демпфера, равной 0,55 Тл.

Кривая 1 соответствует течению при динамической вязкости во всём диапазоне $\eta_2 = 4,977$ Па·с; кривая 2, для МРС практически совпадающая с кривой 3, показывает характер течения при динамической вязкости $\eta_1 = 497,7$ Па·с, это область с малыми скоростями сдвига, в которой происходит разрушение структуры магнитных частиц в МЖ. Кривая 3 соответствует течению с сохранённой структурой МРС, жесткость которой определяется концентрацией магнитной фазы и интенсивностью внешнего магнитного поля, $\tau_0=24$ кПа. Согласно формулам аналитического анализа, кривая поля скоростей состоит из трёх областей: поле скоростей по кривой 1 на расстоянии от стенки до координаты от оси симметрии щелевого зазора r_1 , поле скоростей по кривой 2 в диапазоне координат от оси r_1 до r_0 и поле скоростей по кривой 3 — стержневое течение с постоянной скоростью.

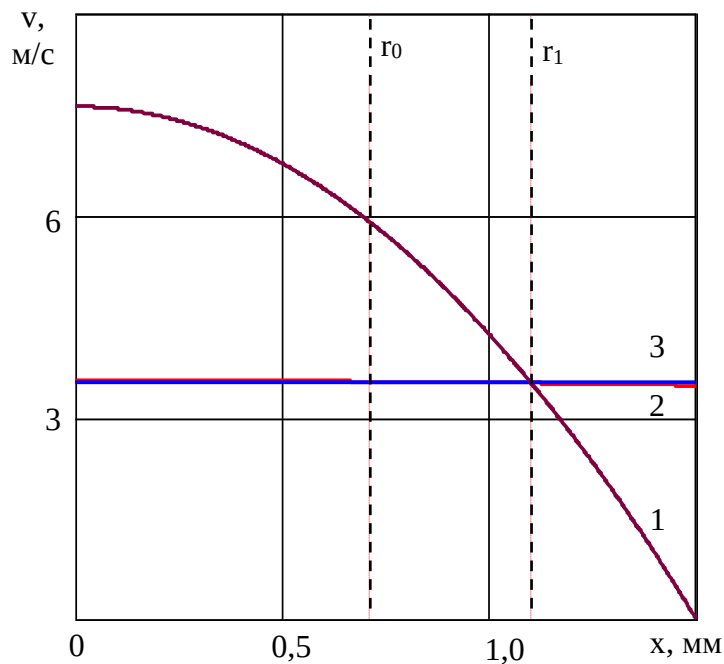


Рисунок 2.6. Профиль скорости в зазоре ЭМЖД: 1 – поле скоростей при $\eta_2 = 4,977 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – при $\eta_1 = 497,7 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 3 – $\tau_0 = 24 \text{ кПа}$

На рисунке 2.7 приведён профиль скорости течения для скорости движения поршня, большей по сравнению с приведённой на рисунке 2.6. При сравнении профилей скорости видно изменение радиусов характерных областей течения при изменении скорости течения МРС.

Участок с вязкостью η_1 , вырожденный практически в прямую линию, характерен для МРС, так как они обладают большим изменением вязкости при увеличении скорости сдвига. При использовании в качестве рабочей среды ЭМЖД нанодисперсной магнитной жидкости, обладающей гораздо меньшим изменением вязкости, участок будет представлять из себя параболу, что проиллюстрировано на рисунке 2.8.

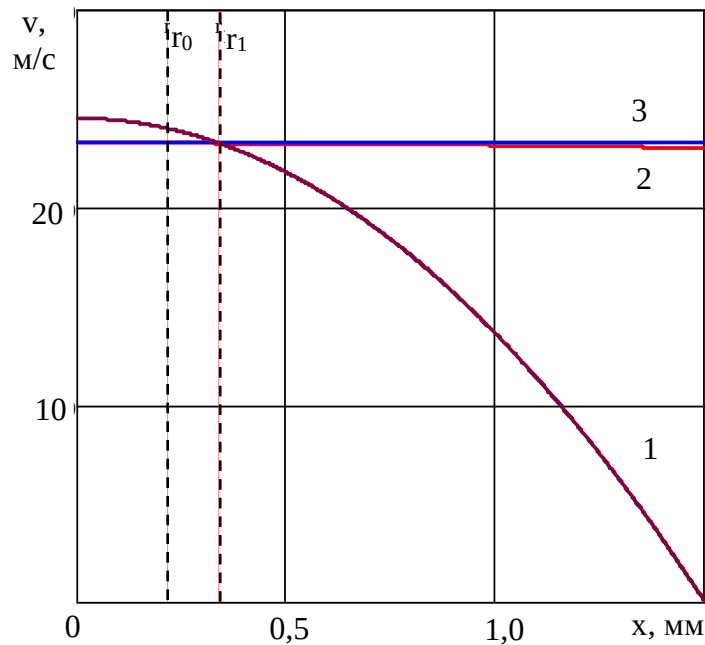


Рисунок 2.7. Профиль скорости в зазоре ЭМЖД: 1 – поле скоростей при $\eta_2 = 4,977 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – при $\eta_1 = 497,7 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 3 – $\tau_0 = 24 \text{ кПа}$

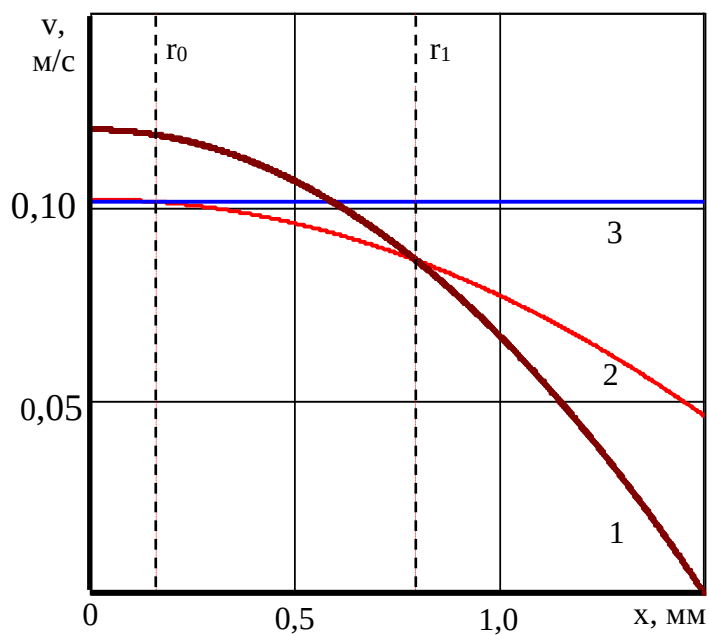


Рисунок 2.8. Профиль скорости течения МЖ в щелевом зазоре, $B = 0,5 \text{ Тл}$: 1 – поле скоростей при $\eta_2 = 0,056 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – при $\eta_1 = 0,12 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 3 – $\tau_0 = 1,0 \text{ Па}$

Профиль 1 соответствует течению при динамической вязкости МЖ $\eta_2 = 0,056 \text{ Па}\cdot\text{с}$; профиль 2 показывает характер течения при средней вязкости $\eta_1 = 0,12 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а кривая 3 соответствует течению с сохранённой структурой МЖ, жесткость которой определяется концентрацией магнитной фазы МЖ и интенсивностью внешнего магнитного поля, $\tau_0 = 1,0 \text{ Па}$.

На рисунке 2.9 пунктирными линиями показаны силовые характеристики ЭМЖД, рассчитанные с помощью разработанного алгоритма для разных значений магнитной индукции.

Нелинейность полученных зависимостей связана с учётом начального участка реологической кривой. Резкий перегиб в силовой характеристике происходит при возникновении в канале областей течения с вязкостью η_2 , т.е. τ_1 становится меньше половины высоты канала.

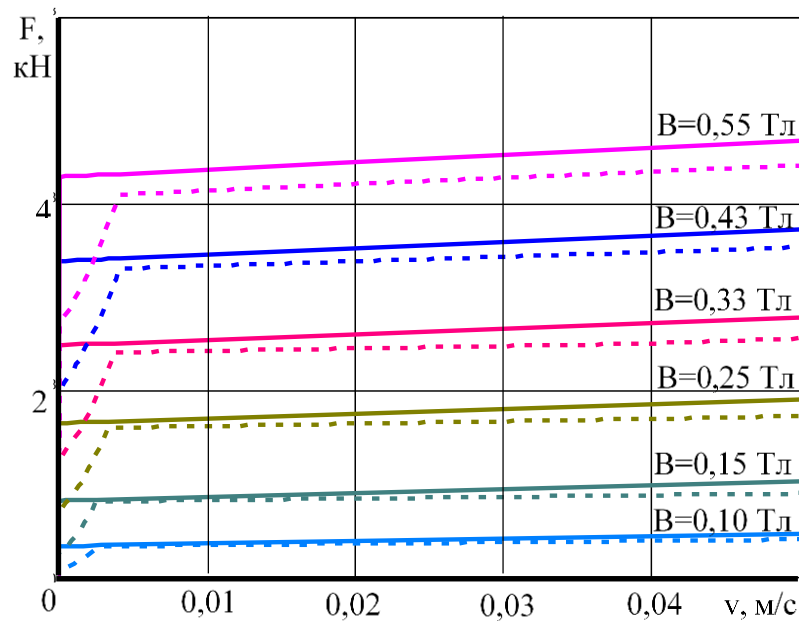


Рисунок 2.9. Силовые характеристики ЭМЖД

Для сравнения был выполнен расчёт силовых характеристик ЭМЖД на основе методики, приведённой в [16, 49, 50, 69] и основанной на представлении МЖ как вязкопластичного тела Бингама (сплошные линии на рисунке 2.9). На рисунке 2.10 проиллюстрированы составляющие силы сопротивления ЭМЖД, рассчитываемые следующим образом:

$$F_{\tau} = \frac{c \cdot \tau_D \cdot h_{\text{пол}} \cdot S_{\text{пор}}}{2 \cdot R} \cdot \text{sgn}(v_0), \quad (2.29)$$

$$F_{\eta} = \left(1 + \frac{w \cdot 2 \cdot R \cdot v_0}{2 \cdot Q} \right) \cdot \frac{12 \cdot \eta_2 \cdot h_{\text{пол}} \cdot S_{\text{пор}}}{w \cdot (2 \cdot R)^3}, \quad (2.30)$$

где F_τ — составляющая силы, полученная за счёт напряжения сдвига, Q — расход МЖ, v_0 — скорость движения поршня, c — безразмерная константа, зависящая от свойств МЖ и геометрии ЭМЖД. F_f (см. рисунок 2.10) — постоянная составляющая силы, полученная за счёт работы силы трения, в данном расчёте не учитывается.

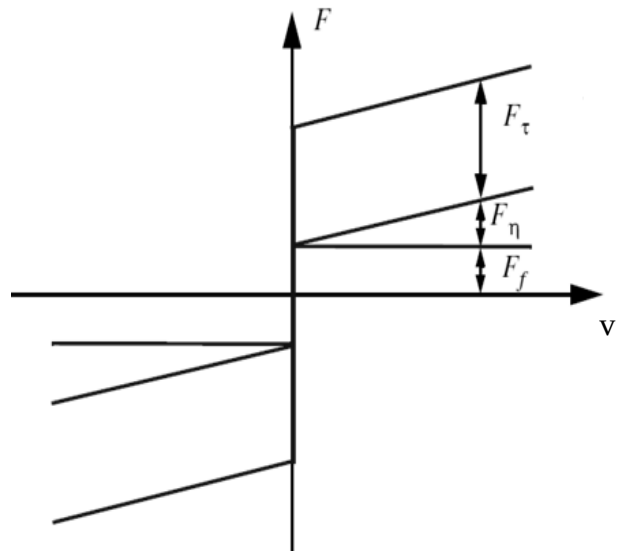


Рисунок 2.10. Характерный вид силовой характеристики ЭМЖД при представлении МЖ как вязкопластичного тела Бингама

Описание МЖ моделью Гершеля-Балкли дает незначительное отклонение силовой характеристики от линейного вида при больших скоростях движения поршня по сравнению с вязкопластичным телом Бингама.

Отметим, что начальное усилие, полученное по результатам расчётов, различно. Разница обусловлена тем, что при описании МЖ моделью Бингама используется τ_d , что безусловно даст завышенные результаты, так как первоначальное усилие сдвига в МЖ равно пределу текучести τ_0 .

Различие в получаемых значениях при большой скорости движения поршня связано с учётом начального участка реологической кривой МРС, а именно с изменением размеров областей течения с различной вязкостью. При развитии течения разница в получаемых результатах не превышает 5%, что соизмеримо с расхождениями между моделью, основанной на представлении МЖ вязкопластичным телом Бингама и экспериментальными результатами, полученными в других исследованиях [10, 39, 49].

Результаты, положенные в основу данной главы, опубликованы в соавторстве в работах [60, 61, 62, 64, 71].

2.5. Выводы

1. Рассмотрено напорное течение МЖ в щелевом канале при внешнем магнитном поле, вектор напряжённости $\vec{H}$ которого перпендикулярен к направлению течения среды. Проанализировано влияние параметров МЖ на профиль скорости течения в зазоре ЭМЖД. Подход, основанный на разбиении реологической кривой МЖ на два участка с различными вязкостями, позволяет говорить о результатах, более приближенных к реальным и менее зависящим от величины скорости сдвига в зазоре ЭМЖД.

2. Разработан оригинальный алгоритм, итерационная процедура и автоматизированный комплекс расчёта (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ), из которой определяются скорость движения поршня, соответствующая силе сопротивления ЭМЖД.

3. Рассчитаны силовые характеристики ЭМЖД для разных значений магнитной индукции с учётом начального участка реологической характеристики, напряжения начального сдвига, изменения вязкости МЖ, реального профиля скоростей течения МЖ в канале демпфера. Погрешность в определении силы сопротивления при малых скоростях движения поршня по сравнению с моделью, основанной на представлении МЖ телом Бингама, в зависимости от величины магнитной индукции, может превышать 50%.

4. Недостатком аналитических моделей является привязка уравнений к определённому типу конструктивного исполнения рабочей зоны ЭМЖД и невозможность получения точного решения для каналов сложной формы. В связи с развитием вычислительной техники конечно-элементное моделирование становится одним из лучших способов поиска новых технических решений и оценке свойств вновь создаваемых устройств.

3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДЕМПФЕРОВ С УЧЁТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

3.1. Моделирование электромеханических магнитожидкостных демпферов с учётом взаимного влияния физических полей

Физические процессы — электромагнитные, гидродинамические и теплофизические — определяют рабочие свойства и срок службы ЭМЖД. Поэтому важно иметь математические методы и средства оценки параметров неоднородных нелинейных физических полей на стадии разработки ЭМЖД.

Работы, связанные с математическим моделированием ЭМЖД, публикуемые в настоящее время, в основном посвящены конечно-элементному анализу электромагнитного поля и экспорту полученного распределения магнитной индукции в сторонний математический пакет (например, Matlab) для расчёта гидродинамических процессов [2, 29, 30, 31]. Однако, практически отсутствуют исследования, посвящённые комплексному конечно-элементному анализу физических полей в ЭМЖД с учётом их взаимного влияния.

Взаимное влияние различных физических процессов в ЭМЖД может быть учтено как набор обратных связей, полученных по результатам расчета взаимовлияющих полей (теплофизических, гидродинамических, электромагнитных параметров и т.д., рисунок 3.1). Безусловно, некоторые из этих зависимостей могут отсутствовать, быть несущественными или ограниченно влиять на характеристики конкретного ЭМЖД. Однако при совместном проявлении они могут приводить к значительным эффектам и должны учитываться при анализе процессов.

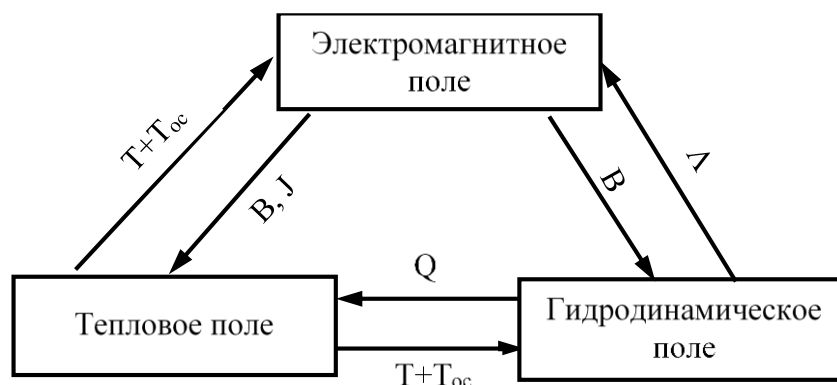


Рисунок 3.1. Взаимное влияние физических полей

На рисунке 3.1 приняты обозначения: T_{oc} – температура окружающей среды, T – превышение температуры над T_{oc} , Q – тепловой поток, B – индукция магнитного поля, J – плотность тока, λ – проводимость путей прохождения магнитного поля.

В ЭМЖД электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы существуют одновременно и во взаимосвязи, которая проявляется во влиянии параметров одних полей на характеристики сред и возбуждающие факторы других полей. Так, изменение температуры меняет магнитную характеристику магнита и его состояние. В тепловом поле по массиву магнита возникает перепад температур, в результате каждый элемент магнита имеет свою рабочую точку на магнитной характеристике, определяемую температурой элемента и распределением магнитного поля.

МЖ имеет большую магнитную проницаемость по сравнению с немагнитными жидкостями. Изменение конфигурации МЖ в зазоре демпфера изменит проводимость путей прохождения магнитного потока и повлечёт его перераспределение. Также необходимо учитывать сложные реологические свойства МЖ, изменение вязкостных и магнитных свойств при изменении магнитной индукции и температуры МЖ. При течении МЖ происходит внутренний разогрев жидкости. С ростом температуры снижается намагниченность, магнитная проницаемость, вязкость и теплопроводность жидкости. Рост магнитной индукции увеличивает «жесткость» цепочек из ферромагнитных частиц в МЖ, создаёт анизотропию теплопроводности и

повышает вязкость жидкости. Для каждого типа МЖ эти зависимости различны, что усложняет моделирование устройств.

Не менее важным вопросом является отказ от учёта тех факторов и явлений, которые не оказывают существенного влияния на процессы в демпфере. Так в МЖ, находящейся под воздействием магнитного поля, возникает дополнительная объёмная сила, действующая на немагнитные тела. Эта сила не вносит существенного вклада в работу устройства при выполнении всех элементов магнитной системы из ферромагнитных материалов и может быть исключена из расчёта. Однако существует большая группа ЭМУ, принцип действия которых основан на действующей в МЖ объёмной силе, и отказ от её учёта даст неверные результаты.

Явление термомагнитной конвекции, заключающееся в течении менее нагретых слоёв МЖ в области с большей напряжённостью магнитного поля, на фоне перемешивания МЖ при движении поршня не оказывает существенного влияния на работу устройства. В связи с этим необходим баланс между точностью и допущениями для сокращения времени расчёта и снижения требований к вычислительным мощностям ЭВМ, выполняющей расчёт.

В общем случае необходим системный подход к математическому анализу взаимозависимых физических полей в ЭМЖД. Такое конечно-элементное моделирование взаимозависимых полей составляет актуальную научную проблему.

3.2. Описание модели, граничные и начальные условия

Созданная конечно-элементная модель включает в себя расчёт электромагнитного, гидродинамического, термодинамического полей с использованием сеток, перестраивающихся в процессе моделирования, дает возможность оценивать происходящие в ЭМЖД процессы с учётом их взаимного влияния. Для исследования была использована среда конечно-

элементного моделирования Comsol FemlabTM, позволяющая учитывать взаимодействия различных физических явлений по общему объёму сетки.

Для уменьшения времени расчёта задача формулировалась в двухмерной осесимметричной постановке, что позволяет значительно сократить число узлов конечно-элементной сетки.

Геометрия разработанной осесимметричной модели для расчёта методом конечных элементов представлена на рисунке 3.2. Модель состоит из стального корпуса 1, заполненного МЖ 2, штока 3 с поршнем, состоящим из катушки управления 4 и двух ферромагнитных полюсов 5. Между поршнем и корпусом имеется зазор для протекания МЖ.

На рисунке 3.3 представлена конечно-элементная сетка, используемая для расчёта. При имитации движения поршня происходила деформация сетки без изменения числа элементов.

Так как профиль скорости потока магнитной жидкости сильно неравномерен и имеет ядро течения, то у стенок поршня и корпуса будут области с большими скоростями сдвига, и, соответственно там нужна более мелкая конечно-элементная сетка. Делать мелкую сетку по всему объёму демпфера нежелательно, так как сильно возрастают требуемые вычислительные мощности [43].

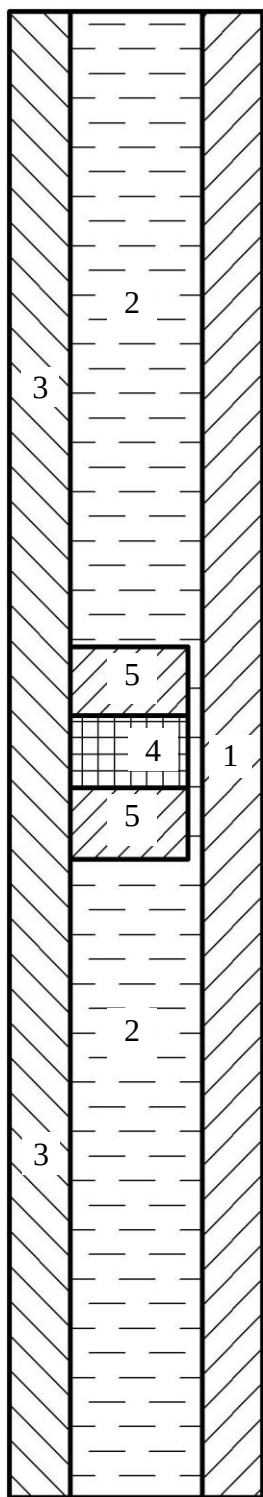


Рисунок 3.2. Геометрия расчётной модели

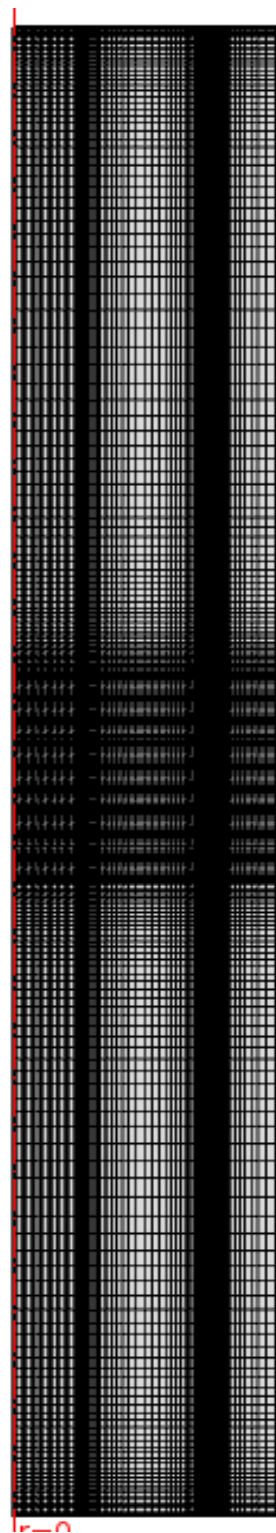


Рисунок 3.3. Конечно-элементная сетка расчётной модели

В качестве основы расчёта электромагнитных полей были использованы отношения, задаваемые уравнениями Максвелла, включая уравнение непрерывности для постоянной плотности электрического заряда,

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (3.1)$$

и закон Ампера,

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (3.2)$$

Здесь $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, $\mathbf{J}$ — плотность тока. Связь между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией $\mathbf{B}$ дается формулой

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \mathbf{H}, \quad (3.3)$$

а между плотностью тока и напряженностью электрического поля $\mathbf{E}$ формулой

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}_e. \quad (3.4)$$

В этих уравнениях μ — относительная магнитная проницаемость материала, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума и σ — электропроводность, $\mathbf{J}_e$ — плотность сторонних токов. Два потенциала, электрический и магнитный, являются прямым следствием закона Гаусса,

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (3.5)$$

и закона Фарадея,

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (3.6)$$

где V — электрический скалярный потенциал, а $\mathbf{A}$ — магнитный векторный потенциал.

Корпус, шток и поршень задавались материалом с кривой намагничивания, соответствующей кривой намагничивания конструкционной стали 3 и представленной на рисунке 3.4. Кривая намагничивания магнитореологической суспензии представлена на рисунке 3.5.

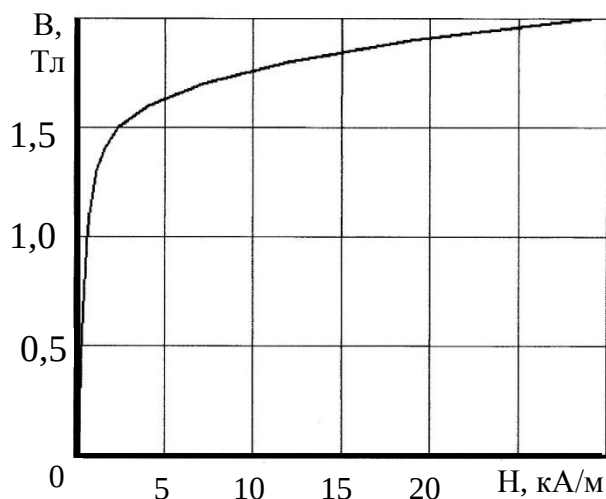


Рисунок 3.4. Кривая намагничивания стали 3

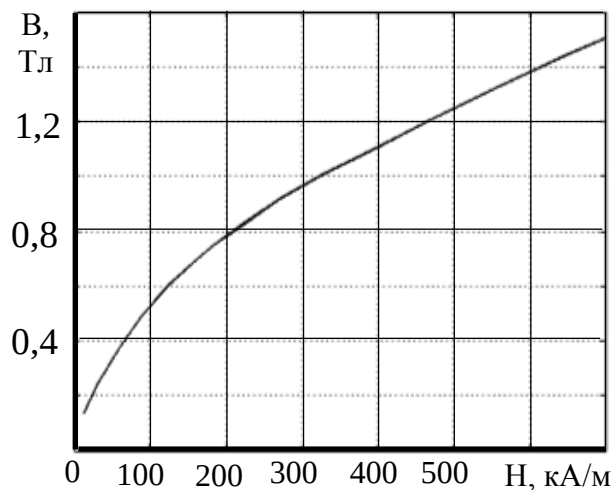


Рисунок 3.5. Кривая намагничивания МЖ

Вихревые токи, наведённые в электропроводящих элементах модели, не учитывались. Это не вносит существенной ошибки в результаты моделирования так как катушка управления питается постоянным током, а скорость движения и частота колебания поршня достаточно малы.

В качестве граничного условия при расчёте электромагнитного поля используется нулевое значение магнитного потенциала на границе расчётной области.

Гидродинамический расчёт основывался на уравнениях Навье-Стокса, решаемых для поля скоростей u и давления p

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla(\eta(\nabla u + (\nabla u)^T)), \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (3.8)$$

где ρ — плотность жидкости, u — вектор скорости, η — динамическая вязкость, t — время, p — давление.

Моделирование гидродинамического поля осуществлялось со следующими допущениями:

- скольжение жидкости по стенкам отсутствует;
- плотность жидкости не зависит от температуры.

Основная сложность при использовании модели с эффективной вязкостью для расчета течений вязкопластической среды связана с бесконечно большим значением вязкости в областях, где скорость деформации равна нулю [53].

В разработанной модели нелинейность вязкости МЖ описывалась уравнением Карро (Carreau), которое используется для описания неньютоновских жидкостей с сильной зависимостью вязкости от скорости сдвига:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left[1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}, \quad (3.9)$$

где η_{∞} — динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации, её наименьшая вязкость; η_0 — динамическая вязкость жидкости при малой скорости сдвиговой деформации, максимальная динамическая вязкость коллоида; K_1 — постоянная жидкости; n — коэффициент степенного закона, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига.

На рисунке 3.6 проиллюстрировано влияние параметров уравнения (3.9) на вид реологической кривой МЖ. Точками на рисунке отмечена экспериментально полученная зависимость для МЖ (рисунок 1.9). Увеличение вязкости при бесконечно малой скорости сдвига η_0 приближает реологическую характеристику к виду, характерному для вязкопластичного тела Бингама. Увеличение временной постоянной K_1 понижает кривую, а коэффициент в показателе степени влияет на скорость выхода реологической кривой на установившееся значение вязкости η_{∞} .

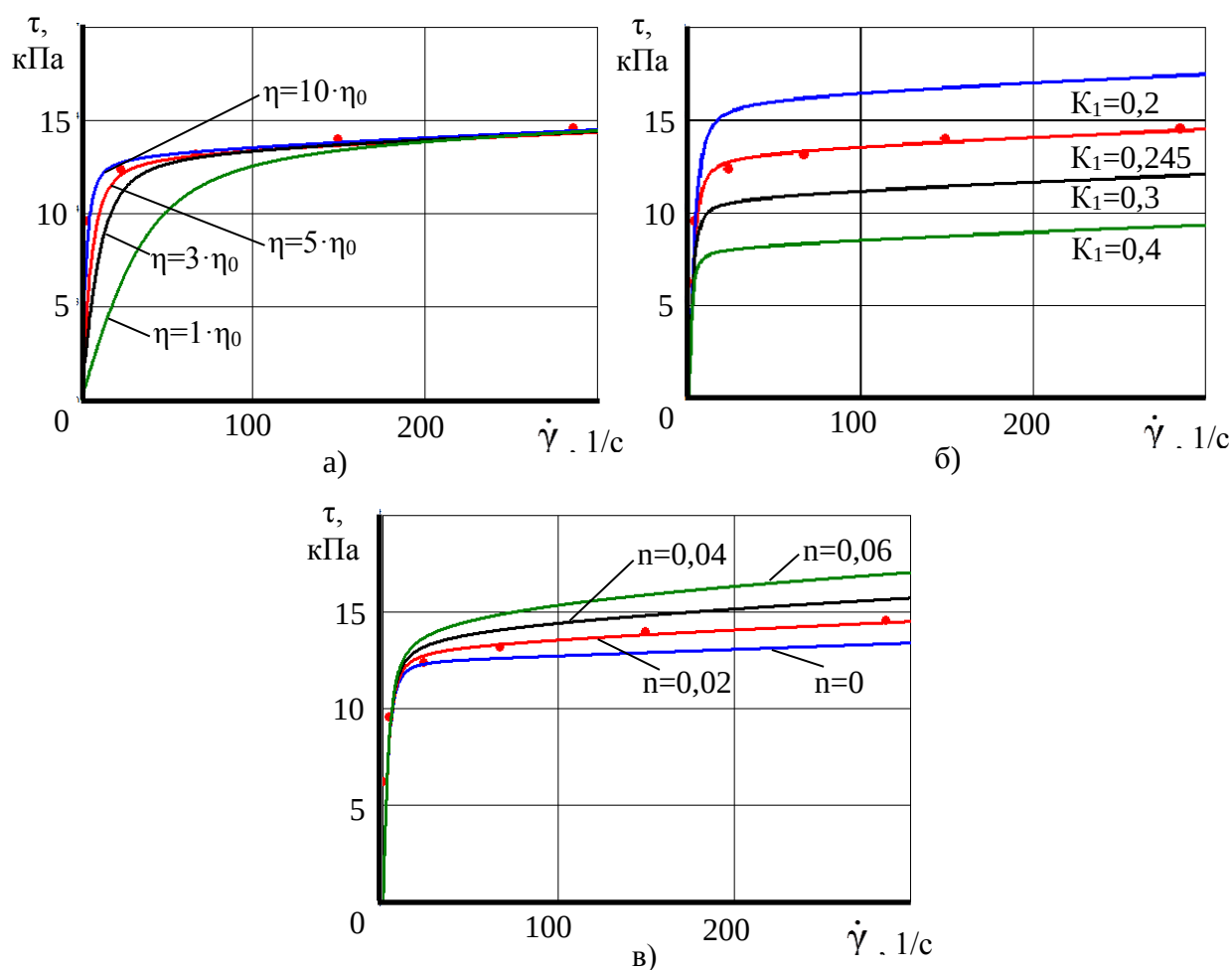


Рисунок 3.6. Влияние параметров уравнения Карро на вид реологической кривой МЖ.
а – изменение вязкости при бесконечно малой скорости сдвига η_0 ; б – изменение постоянной времени K_1 ; в – изменение коэффициента степенного закона n

При моделировании гидродинамического поля были использованы реологические кривые для МЖ, описанные в [20] и представленные на рисунке 1.9. Для точной математической аппроксимации реологического поведения жидкости постоянная K_1 , динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации η_∞ и при малой скорости сдвиговой деформации η_0 приняты зависящими от величины магнитной индукции и заданы кривыми, показанными на рисунке 3.7. Для всех значений магнитной индукции коэффициент в показателе степени $n=0.02$.

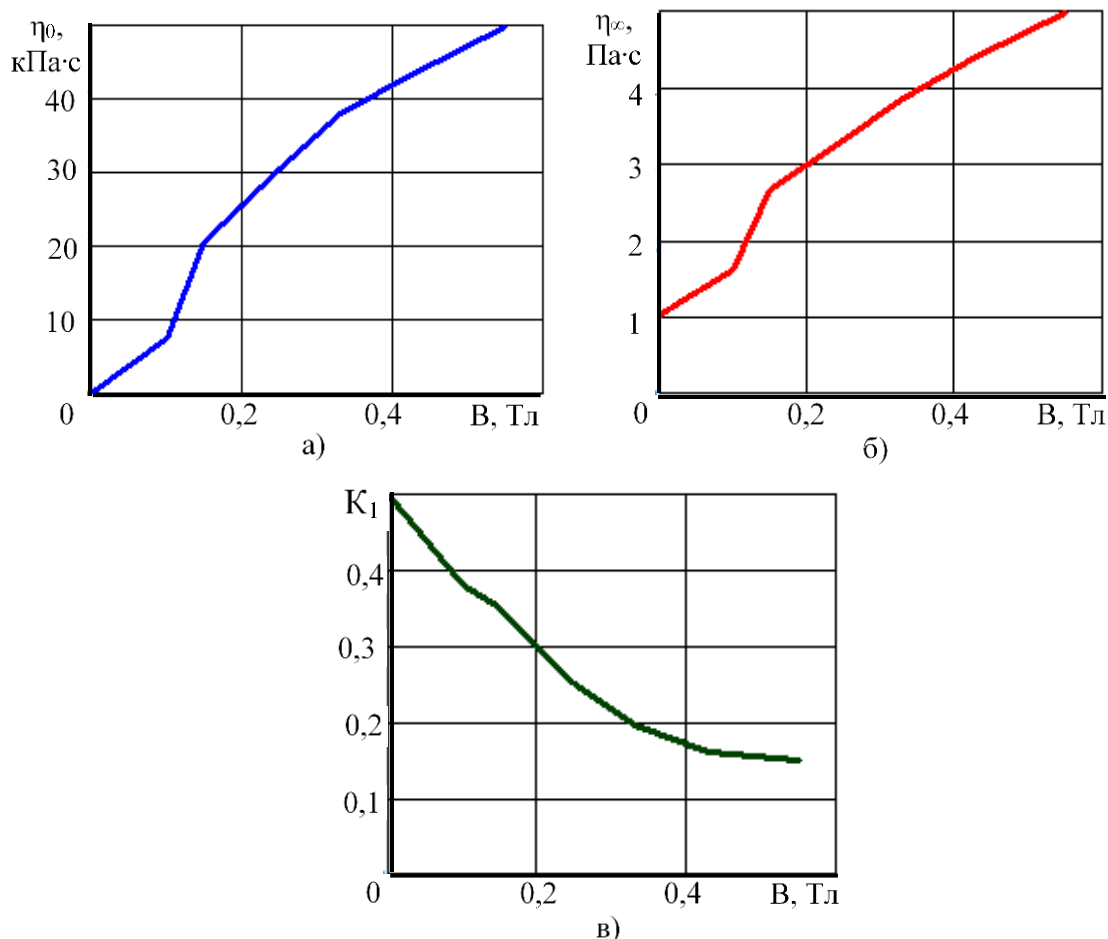


Рисунок 3.7. Зависимости динамической вязкости МЖ при малой (а) и бесконечно большой (б) скоростях сдвиговой деформации, зависимость временной постоянной K_1 (в) от величины магнитной индукции

Математическая аппроксимация вязкости МЖ уравнением (3.9) адекватно описывает её реологические характеристики в широком диапазоне скоростей сдвига. На рисунке 3.8 представлены зависимости касательного напряжения сдвига МЖ от скорости сдвига, полученные по результатам эксперимента, и их математическая аппроксимация. Из рисунка видно, что подбором коэффициентов удалось добиться минимального рассогласования (менее 2 %) между экспериментальными и математически получаемыми результатами. Стоит отметить, что для другой МЖ коэффициенты изменятся, что потребует дополнительных исследований при создании моделей.

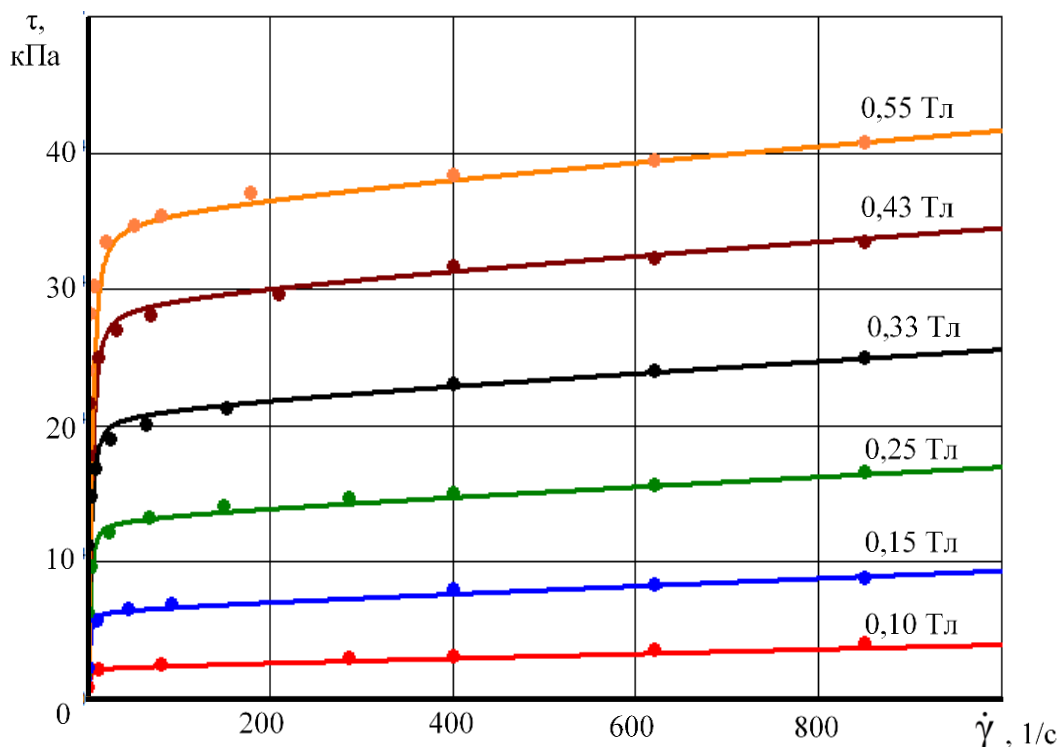


Рисунок 3.8. Реологические кривые МЖ с объёмным содержанием твёрдой фазы 0,28 (обозначены точками) и их математическая аппроксимация (сплошные линии) при различных значениях магнитной индукции

Вязкость МЖ имеет достаточно выраженную температурную зависимость, и отказ от её учёта при создании модели может внести серьёзную погрешность в результаты моделирования рабочих свойств ЭМЖД. На основе анализа работы [21] предложена формула, описывающая изменение вязкости МЖ от температуры:

$$\eta_T = \eta_{20} \cdot \left(1 - C_T \cdot \left(\frac{T - 293}{293} \right) \right), \quad (3.10)$$

где η_{20} – динамическая вязкость МЖ при 293 К, C_T – температурный коэффициент (для данной МЖ равен $C_T = 1,9$), T – температура МЖ.

Стоит отметить, что возможности конечно-элементной модели допускают произвольную температурную зависимость, использование которой, однако, потребует отдельного исследования вязкостно-температурных свойств конкретной МЖ, так как на них оказывают существенное влияние теплофизические свойства жидкости основы и объёмная доля магнитных частиц.

Задача сопряжённого теплообмена решается как в области МЖ, так и во всех элементах демпфера. В МЖ теплообмен осуществляется путём конвекции и теплопроводности. В твёрдых телах передача тепла осуществляется только за счёт теплопроводности. Поле температур непрерывно при переходе от МЖ к элементам корпуса. Выделение тепла происходит из-за вязкостного нагрева МЖ при протекании её через зазор. Возможен учет небольшой сжимаемости жидкости, тогда уравнение следует записать в виде:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \\ = Q - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \frac{\partial p}{\partial T} + \eta [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \cdot \eta \cdot (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] : \nabla \mathbf{u} \end{aligned}, \quad (3.11)$$

где C — теплоёмкость, T — температура, k — теплопроводность, Q — источники теплоты. Второе слагаемое и последний член в правой части представляют источники теплоты от работы давления и вязкостной диссипации, соответственно.

В твёрдых телах внутри цилиндрического корпуса уравнение (3.11) переходит в уравнение теплопроводности.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (3.12)$$

В качестве дополнительного источника теплоты выступают электрические потери в катушке управления

$$Q_e = J \cdot E. \quad (3.13)$$

Теплоотдача во внешнюю среду осуществляется через стенки демпфера согласно закону Ньютона—Рихмана.

$$q_0 = \alpha \cdot (T_c - T_{\text{окр}}), \quad (3.14)$$

где T_c — температура стенки, $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды (воздуха), α — коэффициента теплоотдачи.

При решении было принято:

— начальная температура $T = 293 \text{ K}$;

- теплопроводность стали $k_{СТ} = 44,5 \text{ Вт/(м·К)}$;
- теплопроводность МЖ $k_{МЖ} = 22,5 \text{ Вт/(м·К)}$;
- теплоёмкость стали $C_{СТ} = 475 \text{ Дж/(кг·К)}$;
- теплоёмкость МЖ $C_{МЖ} = 2000 \text{ Дж/(кг·К)}$;
- плотность стали $\rho_{СТ} = 7850 \text{ кг/м}^3$;
- плотность МЖ $\rho_{МЖ} = 4800 \text{ кг/м}^3$.

Для оценки работоспособности модели изучено влияние МДС катушки управления на величину магнитной индукции в зазоре ЭМЖД и влияние величины магнитной индукции на вязкость МЖ. Рассмотрено влияние скорости движения поршня на скорость сдвига в МЖ и её вязкость. Проанализировано влияние МДС катушки управления на величину перепада давления на поршне и силовую характеристику демпфера. Проведено сравнение силовой характеристики, получаемой по результатам аналитического и конечно-элементного расчётов. Изучен разогрев жидкости в процессе диссипации энергии колебаний, распространение тепла по всему объёму ЭМЖД и влияние уменьшения вязкости МЖ на силовую характеристику ЭМЖД

3.3. Результаты математического исследования взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов.

Распределение магнитного поля в участке ЭМЖД с поршнем при МДС катушки управления $I_w=350$ А, полученное по результатам конечно-элементного моделирования, представлено на рисунке 3.9.

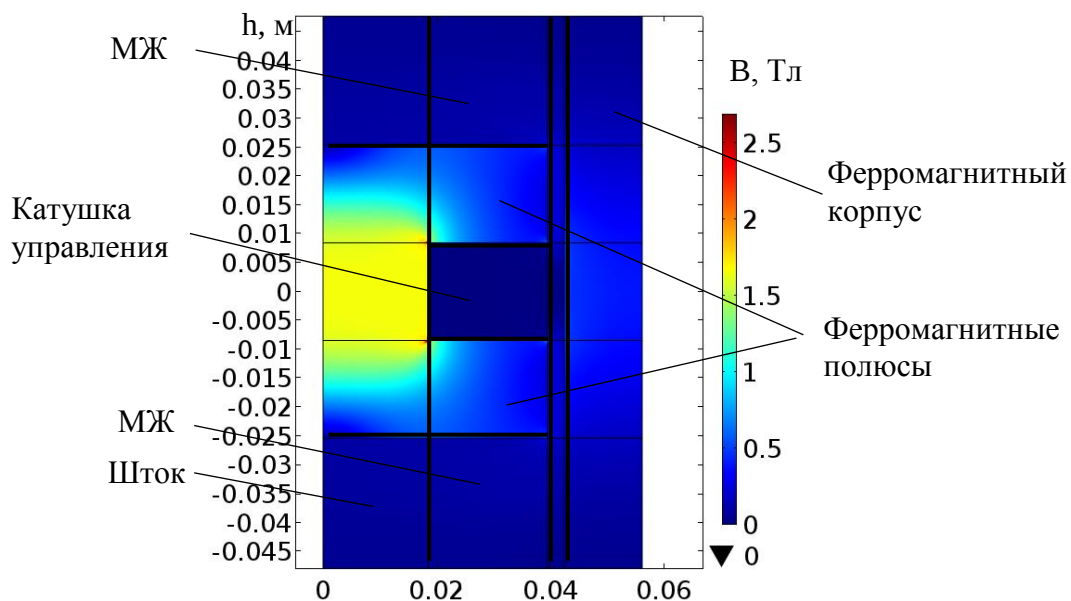


Рисунок 3.9. Распределение магнитного поля при $I_w = 350$ А

Неравномерное распределение магнитного поля в зазоре демпфера, а именно максимумы в области зазора между полюсами поршня и корпусом и снижение магнитного поля в области зазора между катушкой управления и корпусом, объясняется большой разницей магнитных проницаемостей материала корпуса и МЖ и отличием магнитных проводимостей по тому и другому пути. Видно сильное насыщение центральной части поршня, что является недостатком ЭМЖД данной конструкции, так как ограничивает максимальную индукцию в рабочем зазоре.

Распределение магнитной индукции по высоте поршня, вдоль линии, проходящей по центру зазора, представлено на рисунке 3.10. Практически равномерное распределение магнитного поля по высоте полюса и его уменьшение в области расположения катушки управления (границы полюсов

показаны пунктирными линиями) ожидаемо. Переход от значений нормальной составляющей магнитной индукции под полюсом к её минимальному значению в области катушки управления определяется величиной зазора между полюсом и корпусом. Чем меньше зазор, тем уже область перехода значения нормальной составляющей магнитной индукции к минимуму в области расположения катушки управления. Наличие МЖ мало влияет на протяженность области перехода ввиду ее малой магнитной проницаемости. Протяжённость области перехода можно считать равной утроенному размеру зазора.

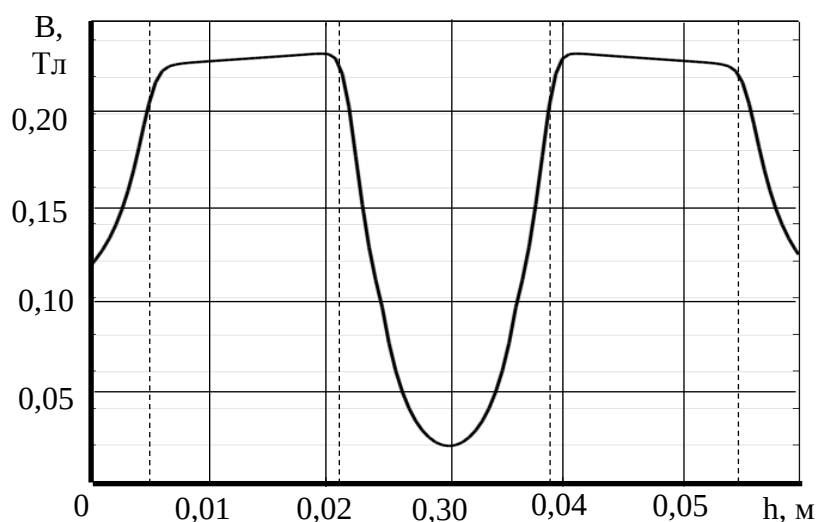


Рисунок 3.10. Зависимость магнитной индукции в зазоре демпфера при $I_w = 350$ А

Динамическая вязкость МЖ по высоте поршня в зазоре между ним и корпусом для распределения магнитной индукции, показанного на рисунке 3.10, представлена на рисунке 3.11. Наблюдается рост вязкости МЖ в областях с большей индукцией магнитного поля, что говорит о тесной взаимосвязи магнитных и гидродинамических явлений. Вязкость МЖ в зазоре уменьшается с ростом скорости движения поршня от 0,025 до 0,25 м/с. При этом распределение вязкости носит сложный характер, обусловленный распределением магнитной индукции и скорости сдвига слоёв МЖ.

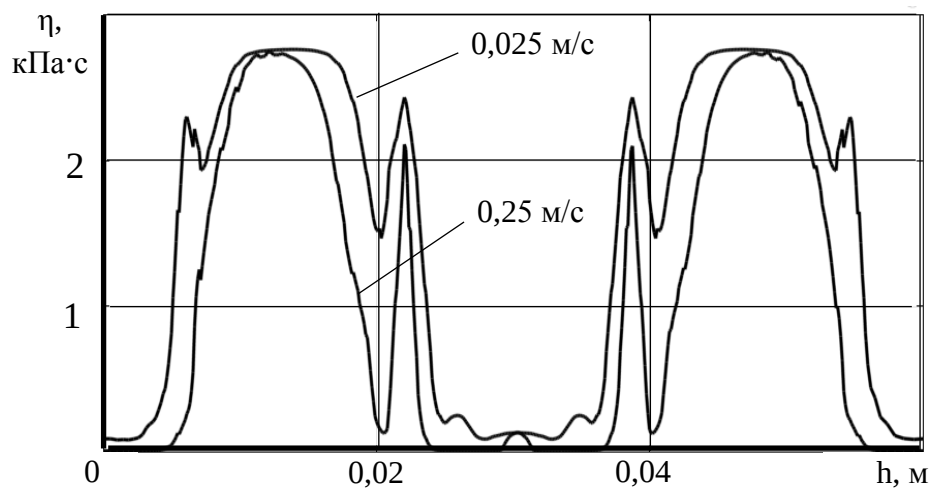


Рисунок 3.11. Зависимость вязкости МЖ в зазоре по высоте поршня для скорости движения поршня 0,025 и 0,25 м/с

На рисунке 3.12 показано изменение профиля течения МЖ в зазоре ЭМЖД при МДС катушки управления $I_w = 350$ А и скорости движения поршня, изменяющейся от 0,001 до 0,05 м/с. Видно, что для всех скоростей движения поршня профиль скорости под полюсом (кривая 2) имеет уплощение по оси канала. С ростом скорости движения поршня различие между профилем скорости под полюсом и межполюсным пространстве (кривая 1) увеличивается.

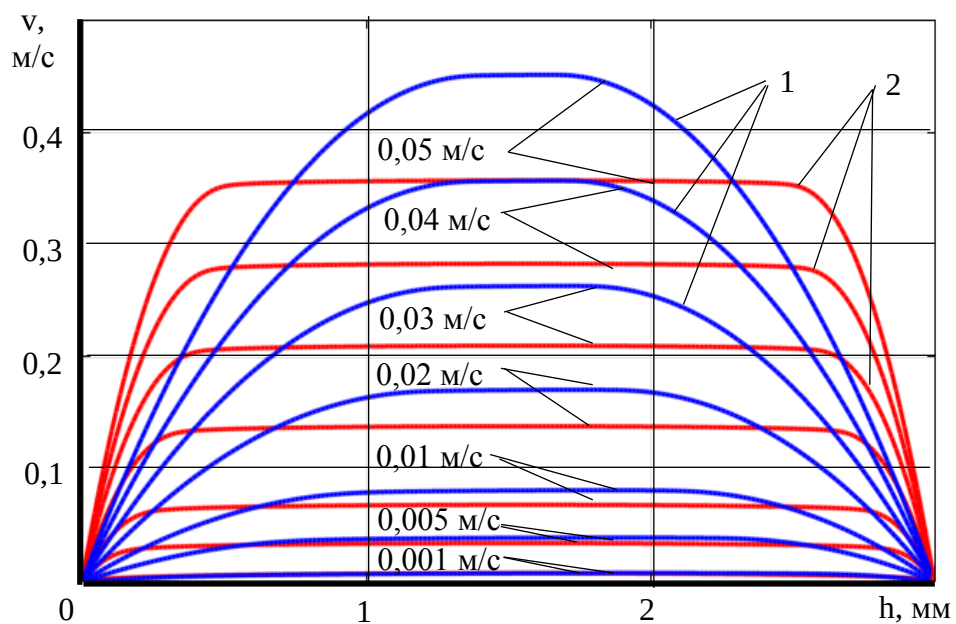


Рисунок 3.12. Изменение профиля скорости в зазоре ЭМЖД при росте скорости движения поршня от 0,001 до 0,05 м/с

На рисунке 3.13 показано распределение магнитной индукции в зазоре ЭМЖД при дискретном изменении МДС катушки управления от 50 до 500 А с шагом 50 А. На рисунке 3.14 показаны графики перепада давления Δp по высоте поршня при скорости движения поршня 0,1 м/с и разных МДС катушки. Из графиков видно, что увеличение МДС в 10 раз приводит к увеличению перепада давления в 4,5 раза. Эта непропорциональность вызвана, в первую очередь, насыщением магнитной системы демпфера.

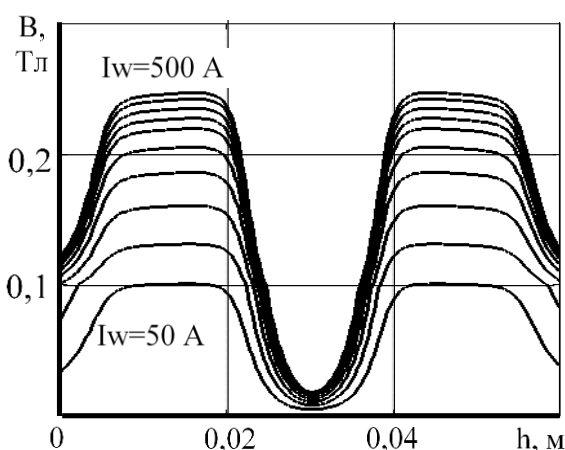


Рисунок 3.13. Распределение магнитной индукции в зазоре ЭМЖД при разной величине МДС катушки

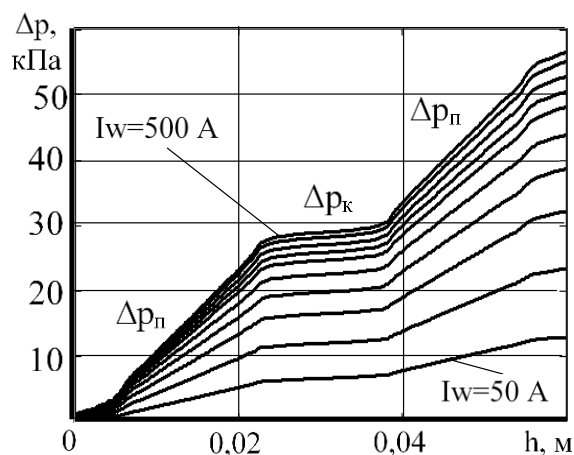


Рисунок 3.14. Перепад давления по высоте поршня для скорости движения поршня 0,1 м/с

При отсутствии магнитного поля наблюдается линейное распределение давления по длине поршня. Для всех зависимостей при наличии магнитного поля в зазоре график перепада давления можно разбить на 3 участка. Участки, соответствующие перепаду давления $\Delta p_{\text{п}}$ под полюсами, имеют больший наклон по сравнению с перепадом давления $\Delta p_{\text{к}}$ в области катушки. Это связано с неравномерным распределением вязкости МЖ в зазоре по высоте поршня.

Результирующая скорость течения МЖ в зазоре между поршнем и корпусом одинакова во всех областях зазора и определяется совместным действием на течение МЖ магнитного поля под полюсами и его отсутствием в области расположения катушки управления. Расход среды при движении поршня одинаков в любом поперечном сечении щелевого зазора, но потери

напора Δp различны и зависят от эффективной вязкости жидкой среды на данном участке.

На рисунке 3.15 представлено изменение силы сопротивления ЭМЖД при росте магнитной индукции в зазоре. Сила сопротивления демпфера, равна произведению падения давления на поршне и площади его поперечного сечения [49]. При увеличении магнитной индукции в зазоре ЭМЖД от 0 до 0,25 Тл сила сопротивления ЭМЖД увеличивается более чем в 10 раз.

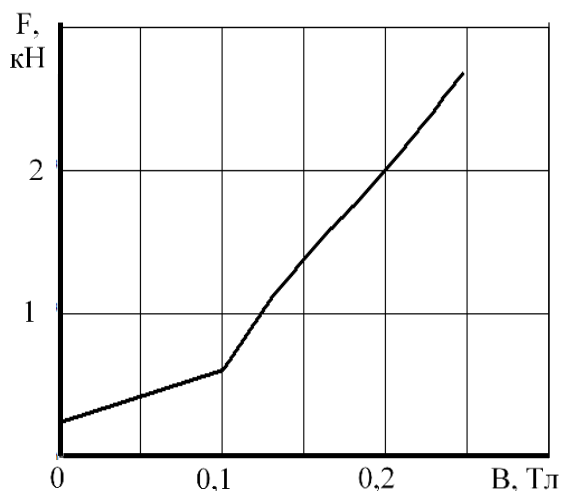


Рисунок 3.15. Сила сопротивления ЭМЖД для скорости движения поршня 0,1 м/с от значений магнитной индукции

В процессе диссипации энергии при движениях и колебаниях поршня в вязкой среде неизбежно повышение температуры МЖ и конструктивных элементов демпфера, что может оказать влияние на стабильность характеристик ЭМЖД. На рисунке 3.16 приведена картина распределения температуры по объёму демпфера после 20 с работы при магнитной индукции в зазоре под полюсами 0.3 Тл. Колебания поршня задавались по гармоническому закону

$$x(t) = 0.127 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 0.4 \cdot t). \quad (3.15)$$

Из рисунков видно, что при зазоре между поршнем и корпусом 3 мм (рисунок 3.16, а) разогрев демпфера незначителен, однако при уменьшении зазора до 1 мм (рисунок 3.16, б) за 20 с работы температура возрастает на 15 К.

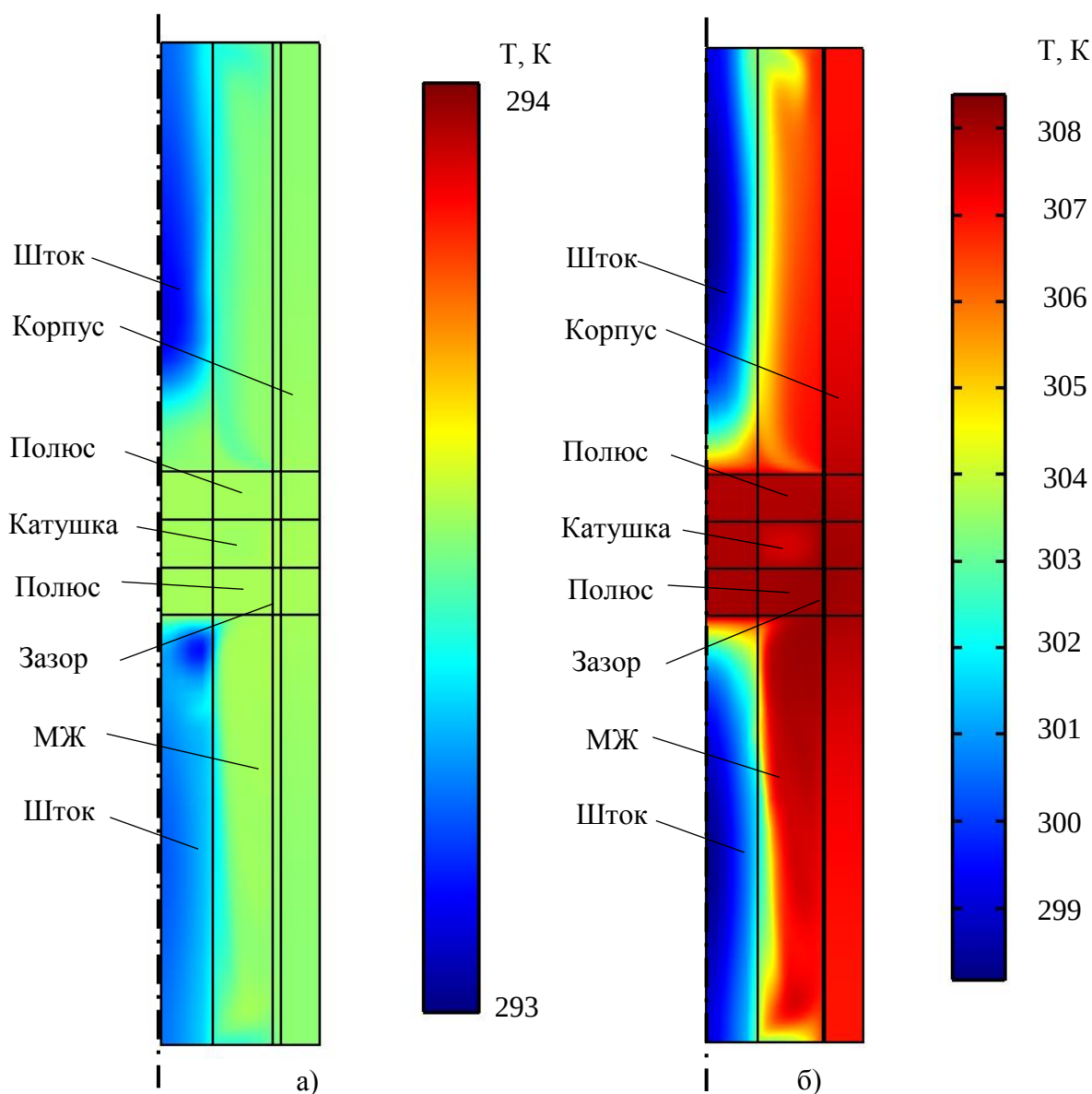


Рисунок 3.16 Распределение температуры по объёму демпфера:
 $t = 20$ с; $B_n = 0,3$ Тл; а – зазор 3 мм; б – зазор 1 мм

Для оценки термодинамического состояния демпфера получены значения температур МЖ в точке, лежащей посередине зазора между поршнем и корпусом. На рисунке 3.17 виден рост температуры МЖ во время работы демпфера для конструкций с зазором между поршнем и корпусом 3 мм (рисунок 3.17,а) и 1 мм (рисунок 3.17,б). Показано явное влияние МДС катушки управления на рост температуры ЭМЖД.

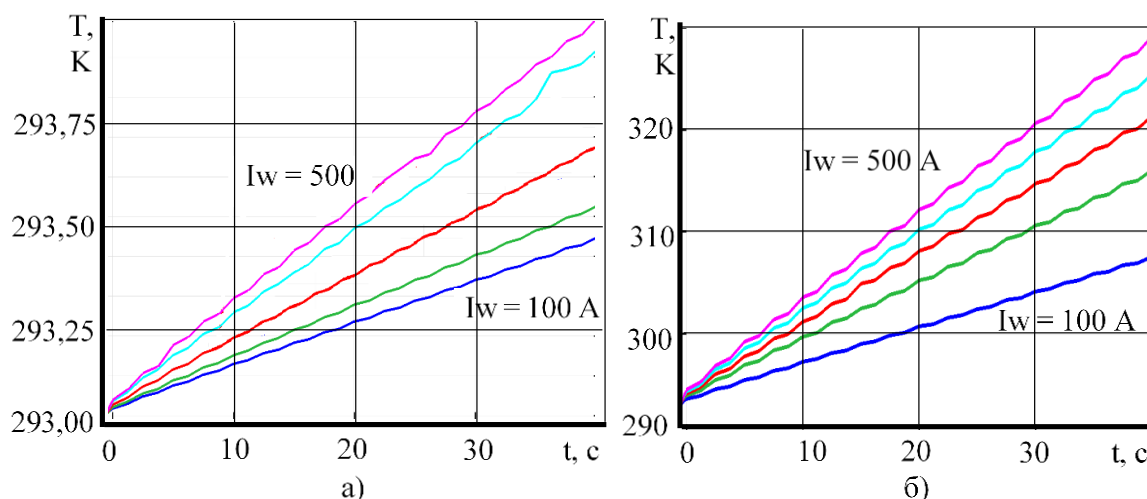


Рисунок 3.17 Температура МЖ в зазоре между поршнем и корпусом во время работы демпфера: а – зазор 3 мм; б – зазор 1 мм

Однако данные зависимости получены без учёта уменьшения вязкости МЖ с ростом температуры. При уменьшении вязкости диссипационные потери уменьшаются и рост температуры происходит не так интенсивно, что показано на рисунке 3.18.

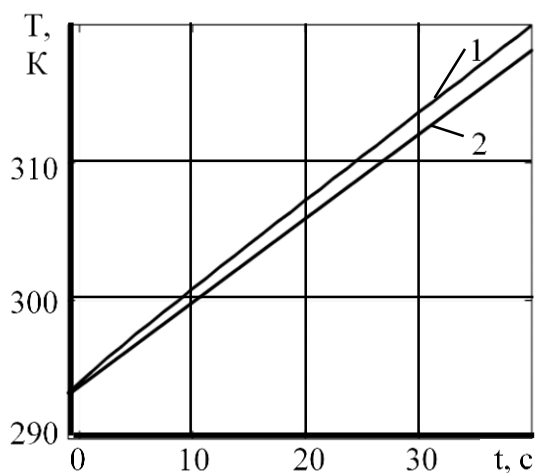


Рисунок 3.18. Температура МЖ без учёта (1) и с учётом (2) изменения вязкости при индукции под полюсом 0,3Тл и зазоре между поршнем и корпусом 1 мм

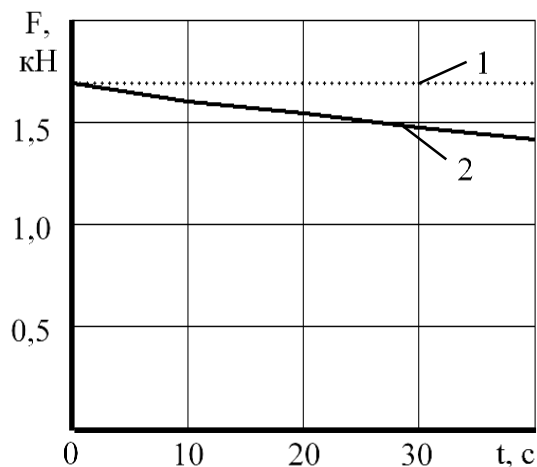


Рисунок 3.19. Сила сопротивления ЭМЖД для индукции 0,3 Тл и зазоре между поршнем и корпусом 1 мм без учёта (1) и с учётом (2) изменения температуры и вязкости МЖ

Вследствие уменьшения вязкости уменьшается и сила сопротивления ЭМЖД. На рисунке 3.19 показано изменение силы сопротивления ЭМЖД во время работы. Линия 1 соответствует силе без учёта влияния температуры на

вязкость МЖ, линия 2 показывает уменьшение силы сопротивления ЭМЖД, вызванное уменьшением вязкости МЖ при разогреве. Так, при повышении температуры МЖ на 33 градуса сила сопротивления ЭМЖД уменьшается на 16,5%.

На рисунке 3.20 показано изменение перепада давления по высоте поршня с ростом скорости движения поршня при величине магнитной индукции в зазоре ЭМЖД 0,25 Тл. На рисунке 3.21 представлена зависимость силы сопротивления демпфера, полученная как произведение падения давления на поршне и площади его поперечного сечения, от скорости движения поршня.

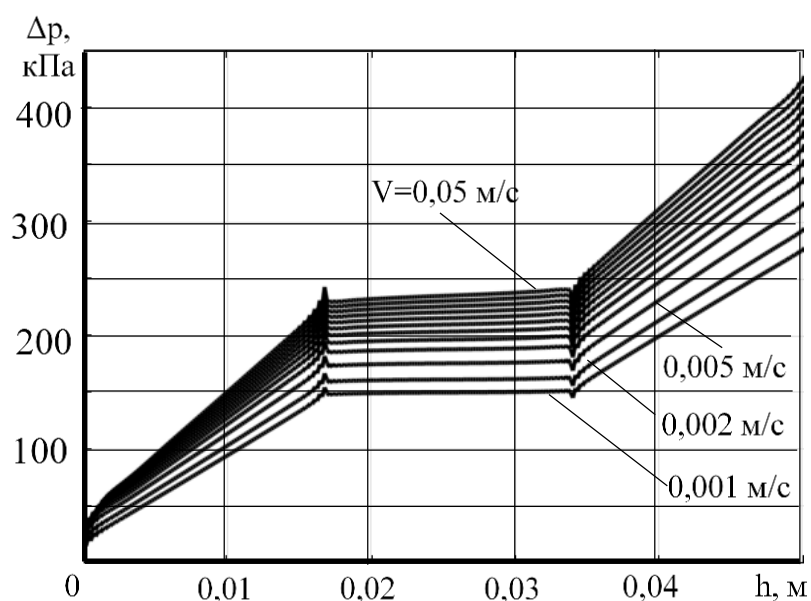


Рисунок 3.20. Перепад давления по высоте поршня для индукции в зазоре ЭМЖД $B=0,25$ Тл

На рисунке 3.21 приведено сравнение силовых характеристик, полученных по результатам аналитического расчёта и конечно-элементного моделирования. Зависимость 1 получена по методике с представлением МЖ вязкопластичным телом Шведова-Бингама, зависимость 2 — по методике, приведённой в главе 2. Характеристика 3 получена по результатам конечно-элементного моделирования.

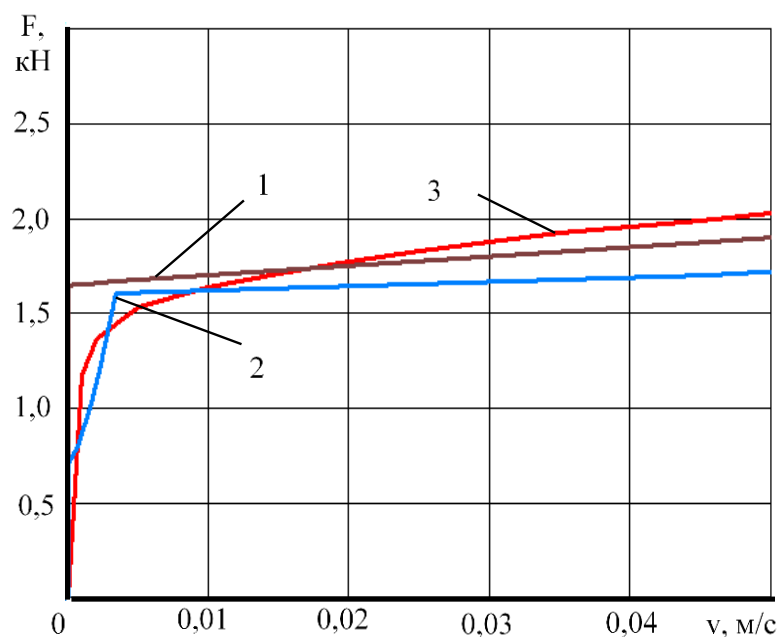


Рисунок 3.21. Сила сопротивления ЭМЖД для индукции 0,25 Тл: 1 – МЖ описывается как тело Шведова-Бингама; 2 — получена по методике, приведённой в главе 2; 3 – получена по результатам конечно-элементного моделирования.

При сравнении зависимостей видно, что при скорости движения поршня до 0,008 м/с аналитически полученные результаты, основанные на разбиении реологической кривой МЖ на несколько участков, дают лучшее совпадение с результатами конечно-элементного моделирования.

Необходимо отметить, что конечно-элементная модель не учитывает начальную силу «трогания» демпфера, возникающую из-за наличия в МРС, находящейся под воздействием магнитного поля, предела текучести. Однако, применение модели Карро для описания вязкости МЖ достаточно быстро выводит силовую характеристику в область физически обоснованных значений.

При больших скоростях движения поршня различие между результатами конечно-элементного моделирования и аналитических решений не превышает 15% и в первую очередь обусловлено наличием магнитного поля в межполюсном пространстве и его влиянием на вязкость МЖ. В аналитической модели поле в межполюсном пространстве не учитывается.

Результаты, положенные в основу данной главы, были опубликованы в соавторстве в работах [27, 59, 66, 73].

3.4. Выводы

1. Разработана математическая модель ЭМЖД с учётом влияния феррогидродинамических, магнитных и тепловых процессов, нелинейности свойств использованных материалов на вязкость и реологические свойства МЖ, силу сопротивления и жесткость демпфера.

2. Проведены расчетные исследования магнитных, феррогидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД. Выявлено существенное взаимное влияние их друг на друга. Показано, что с ростом магнитной индукции можно более чем в восемь раз увеличить силу сопротивления ЭМЖД. Отмечено, что при повышении температуры МЖ на 33 градуса сила сопротивления ЭМЖД уменьшается на 16,5%.

3. Результаты, полученные конечно-элементным моделированием, показывают хорошее совпадение с аналитическими решениями и могут использоваться для предварительной оценки рабочих свойств ЭМЖД и проведения поиска новых технических решений для совершенствования конструкции ЭМЖД.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МАГНИТОЖИТКОСТНОГО ДЕМПФЕРА

4.1. Пути совершенствования электромеханических магнитожидкостных демпферов

Совершенствование конструкции ЭМЖД является важным направлением работы по повышению эффективности демпфирования колебаний. Во многих случаях конструктивные решения, описанные в документах на интеллектуальную собственность, являются неэффективными и малопригодными для использования в реальных условиях эксплуатации.

Можно выделить следующие направления, по которым возможна работа по повышению эффективности ЭМЖД:

- увеличение максимальной напряжённости магнитного поля в областях основной диссипации энергии в движущейся МЖ;
- увеличение протяжённости дроссельных каналов, в которых происходит вязкостная диссипация и рассеивание энергии колебаний;
- уменьшение магнитных потоков рассеяния, не воздействующих на МЖ, а замыкающихся по вспомогательным конструктивным элементам и/или по воздуху;
- уменьшение магнитного потока, воздействующего на МЖ в областях, где не происходит значительной диссипации энергии колебаний;
- уменьшение фрикционного взаимодействия между подвижным элементом и корпусом с использованием эффекта центрирования немагнитных тел в МЖ, находящейся под воздействием градиентного магнитного поля;
- снижение возникающих в локальных областях МЖ максимальных перегревов, ухудшающих магнитные и вязкостные свойства МЖ и оказывающих негативное действие на стабильность работы демпфера;

- использование эффекта магнитной пружины для формирования необходимой силовой характеристики демпфера;
- применение мер, направленных на уменьшение сил одностороннего магнитного тяжения, возникающих при смещении осей подвижной и неподвижной частей демпфера, выполненных из ферромагнитных материалов.

Работы по совершенствованию конструкции ЭМЖД в основном направлены на поиск рациональных соотношений между размерами элементов магнитной системы демпфера [14, 17, 19].

Использование эффекта магнитной пружины представляется перспективным направлением развития ЭМЖД, но не отражено ни в отечественной, ни в иностранной литературе. Целью данной главы является исследование возможности использования эффекта магнитной пружины для расширения диапазона регулирования и изменения вида силовой характеристики ЭМЖД.

4.2. Эффект магнитной пружины в электромеханических устройствах с магнитной жидкостью

Эффект магнитной пружины, проявляющийся в возникновении усилий, возвращающих смещающийся элемент устройства в исходное положение, известен. Такие усилия возникают при сближении одноименных полюсов постоянных магнитов или при боковом смещении двух магнитопроводящих деталей, вызывающем уменьшение их общей проводимости магнитному потоку. Эффект магнитной пружины используется в шаговых двигателях, в синхронных муфтах с явными полюсами и т.п.

В магнитожидкостных устройствах проявление эффекта магнитной пружины имеет свои особенности. В первую очередь это проявляется в том, что усилия магнитной пружины возникают не только при ферромагнитных полюсах, разделённых зазором, но и при сочетании деталей, выполненных из ферромагнитного и немагнитного материалов. Кроме того, в ЭМЖД всегда

есть сочетание поверхностей, движущихся друг относительно друга. Возникновение усилий магнитной пружины в устройствах с МЖ поясняют принципиальные конструкции, изображённые на рисунках 4.1 и 4.2.

Пусть немагнитный участок поршня располагается в области с низкой магнитной проводимостью, как это показано на рисунке 4.1. При смещении поршня немагнитный подвижный элемент из области с низкой магнитной проводимостью переходит в область с высокой проводимостью, при этом выталкивая МЖ из этой области, что вызывает уменьшение магнитной проводимости и искривление магнитных силовых линий. Возникает сила, стремящаяся вернуть немагнитный элемент в область с более низкой магнитной проводимостью. Аналогичный эффект возникает в системе с подвижным элементом из ферромагнитного материала (рисунок 4.2).

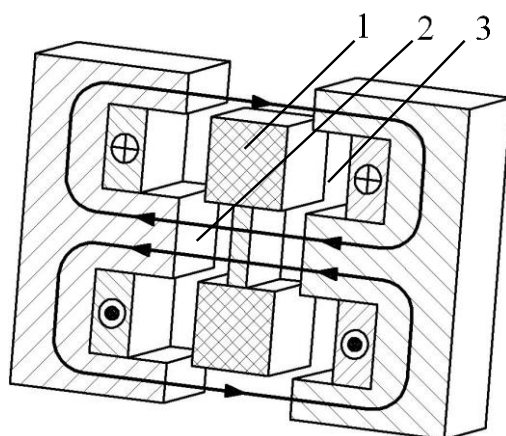


Рисунок 4.1. Расположение немагнитного подвижного элемента:
1 – немагнитный подвижный элемент;
2 – область с высокой магнитной проводимостью;
3 – область с низкой магнитной проводимостью

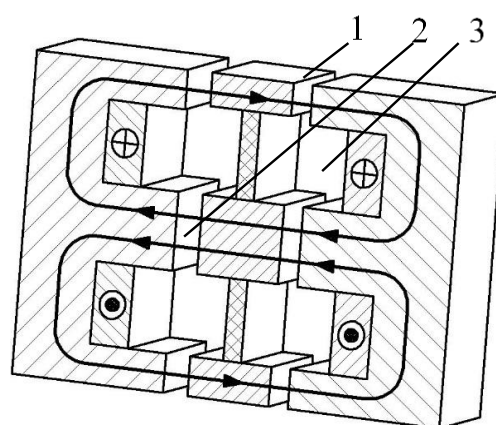


Рисунок 4.2. Расположение магнитного подвижного элемента:
1 – магнитный подвижный элемент;
2 – область с высокой магнитной проводимостью;
3 – область с низкой магнитной проводимостью

Магнитный подвижный элемент (рисунок 4.2) располагается в области зазора с высокой магнитной проводимостью. При смещении магнитного подвижного элемента из области с высокой магнитной проводимостью в область с низкой проводимостью происходит искривление магнитных силовых линий, и результирующая магнитная проводимость системы

уменьшается. Появляется сила, стремящаяся вернуть магнитный элемент в область с более высокой магнитной проводимостью. При этом нахождение МЖ в зазоре демпфера будет уменьшать возникающую силу незначительно, так как магнитная проницаемость МЖ по сравнению, например, с ферромагнитными материалами, невелика.

В основе формирования силовой характеристики ЭМЖД лежит возможность изменения вязкости МЖ при изменении напряжённости магнитного поля. Использование принципа магнитной пружины открывает дополнительные возможности по изменению вида силовой характеристики, заключающиеся в возникновении усилия магнитной природы при смещении подвижного элемента от нейтрального положения. С этой целью в рабочем зазоре неподвижного корпуса создают чередующиеся области высокой и низкой магнитной проводимости, заполненные МЖ, магнитными или немагнитными элементами.

4.3. Разработка установки для экспериментального исследования электромеханических магнитожидкостных демпферов

Для экспериментального исследования ЭМЖД была разработана установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 4.3. Приводной двигатель через понижающий редуктор приводит в движение кривошипно-шатунный механизм, вызывающий вынужденные гармонические колебания поршня. Частота вращения двигателя, регулируемая в широких пределах, измеряется тахометрическим датчиком ROTARY ENCODER TYPE LPD 3806-360BM-G5-24C и передаётся в ЭВМ с помощью интерфейсной платы ввода/вывода сигналов National Instruments PCI 6023E, имеющей возможность в режиме реального времени опрашивать 8 аналоговых и 8 цифровых каналов. Выходной конец кривошипно-шатунного механизма соединён со штоком демпфера через динамометрическое устройство YZC-

516С на основе тензорезисторов, электрический сигнал с которых поступает на плату ввода/вывода сигналов PCI 6023Е и передаётся в ЭВМ. Положительное значение сигнала соответствует растяжению динамометрического устройства, отрицательное — сжатию. Корпус демпфера неподвижно закреплён между полюсами электромагнита. Изменение тока в четырёх согласно включённых катушках электромагнита позволяет менять индукцию в зазоре между полюсами от 0 до 2 Тл, что гарантированно перекрывает диапазон индукций, достижимый в промышленных ЭМЖД [3, 10, 46]. Измерение магнитной индукции осуществлялось при помощи тесламетра WT10A WEITE MAGNETIC TECHNOLOGY CO., LTD. Щуп тесламетра располагался между корпусом демпфера и полюсом электромагнита. Индукция внутри демпфера определялась на основе предварительно измеренной зависимости индукции внутри демпфера от индукции между демпфером и полюсом электромагнита.

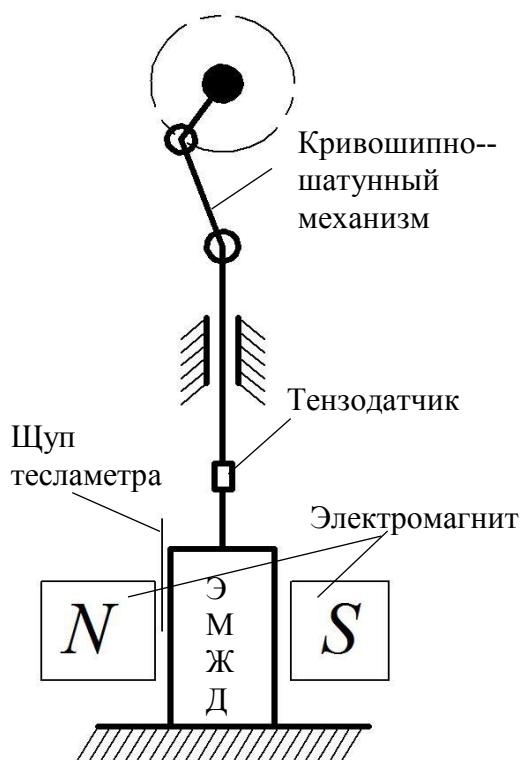


Рисунок 4.3. Принципиальная схема экспериментальной установки

Фотография изготовленного стенда для испытания ЭМЖД представлена на рисунке 4.4.

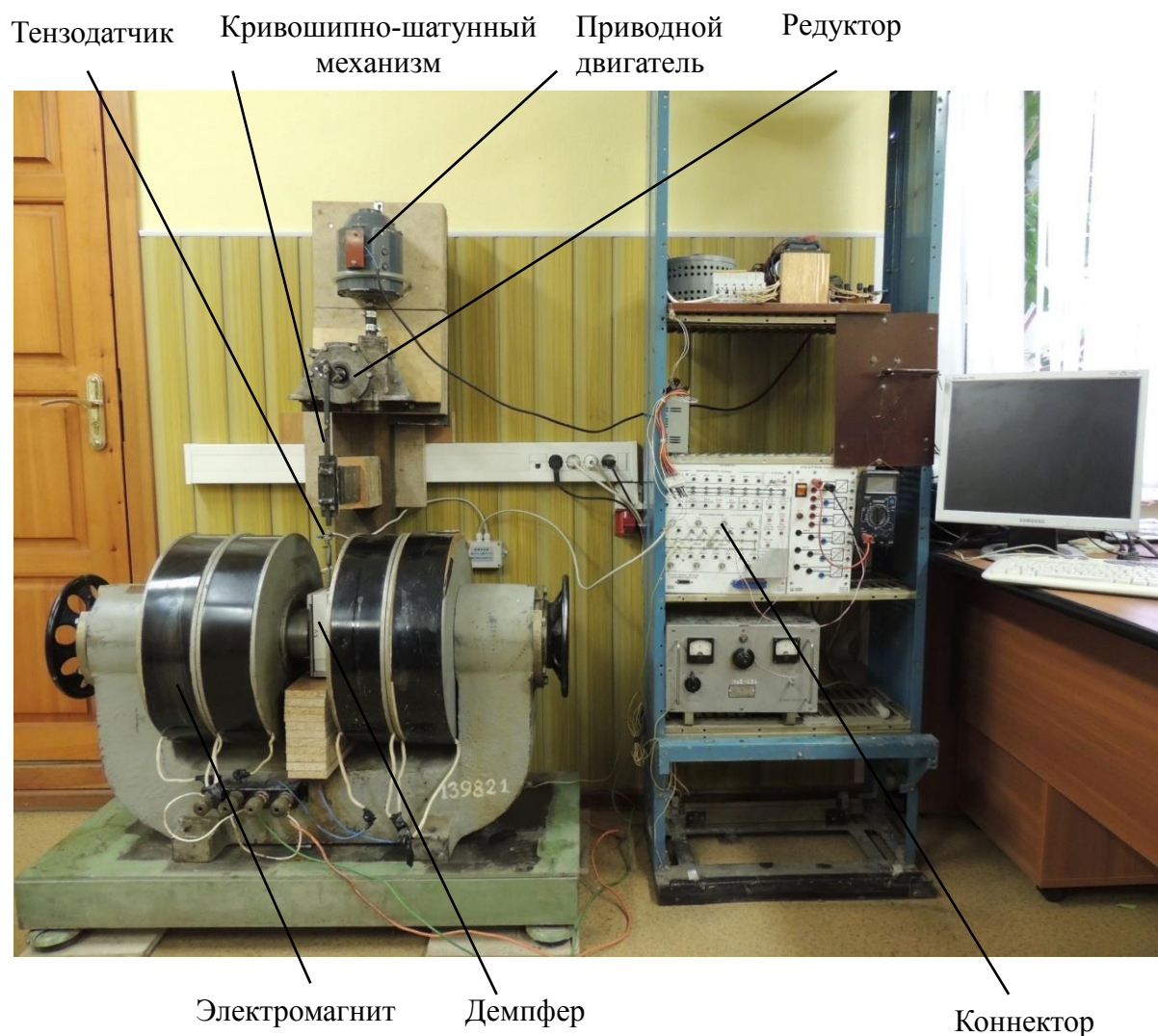


Рисунок 4.4. Стенд для испытания ЭМЖД

Конструкция ЭМЖД, разработанного для экспериментальных исследований, показана на рисунке 4.5.

Корпус демпфера состоит из двух прямоугольных немагнитных стенок, на которых размещено по два стальных полюса высотой 10 мм, разделённых немагнитным участком высотой 10 мм. Торцы демпфера закрыты немагнитными боковыми стенками. Во время работы точками опоры для движущегося поршня служат отверстия в дне и крышке демпфера, а также пазы в боковых стенках, что позволяет избежать боковых смещений поршня. Сквозное движение штока позволяет сохранять постоянным объём внутри демпфера. Зазор между поршнем и корпусом составляет 2 мм с каждой из

сторон поршня. Зазор между торцами поршня и боковыми стенками демпфера практически отсутствует.

Применение плоскопараллельной конструкции необходимо для того, чтобы распределение магнитного поля в демпфере, при использовании внешней магнитной системы, повторяло распределение магнитного поля в наиболее распространённых цилиндрических ЭМЖД. Так как ширина кольцевого зазора, в котором происходит перетекание МЖ при движении поршня в цилиндрических ЭМЖД, значительно меньше диаметра демпфера и при анализе процессов этот зазор рассматривают как плоскую щель, то плоскопараллельная модель допустима.

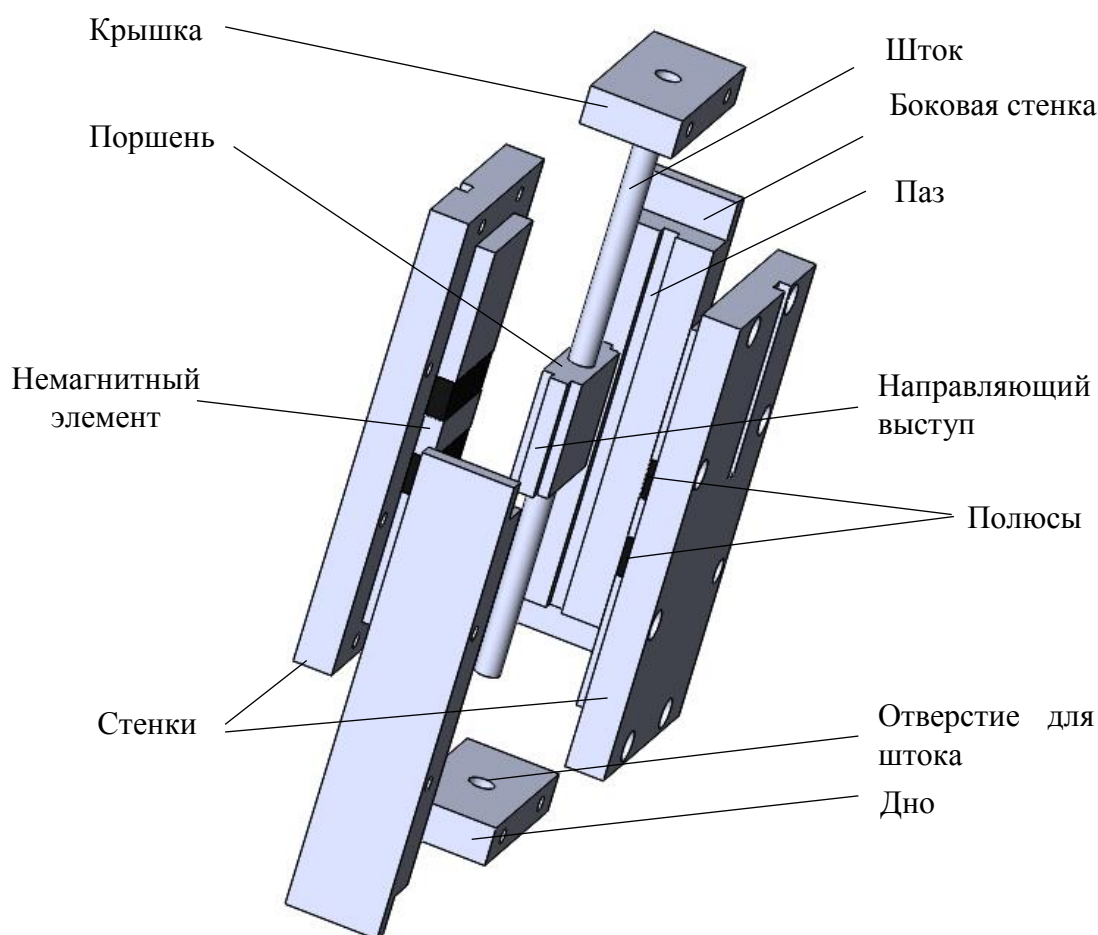


Рисунок 4.5. Модель электромеханического магнитожидкостного демпфера

Гармонические колебания поршня в неподвижном корпусе совершались относительно двух первоначальных положений. В «положении 1» (рисунок 4.6,а)

верхний и нижний края поршня совпадают с краями полюсов корпуса. В «положении 2» (рисунок 4.6,б) верхний край поршня совпадает с нижним краем верхнего полюса корпуса, т.е. поршень смещён вниз на 10 мм. Гармонические колебания поршня происходили вверх и вниз относительно этих положений с амплитудами 10 или 20 мм. Так же на рисунке 4.6 приведены некоторые геометрические размеры изготовленного ЭМЖД.

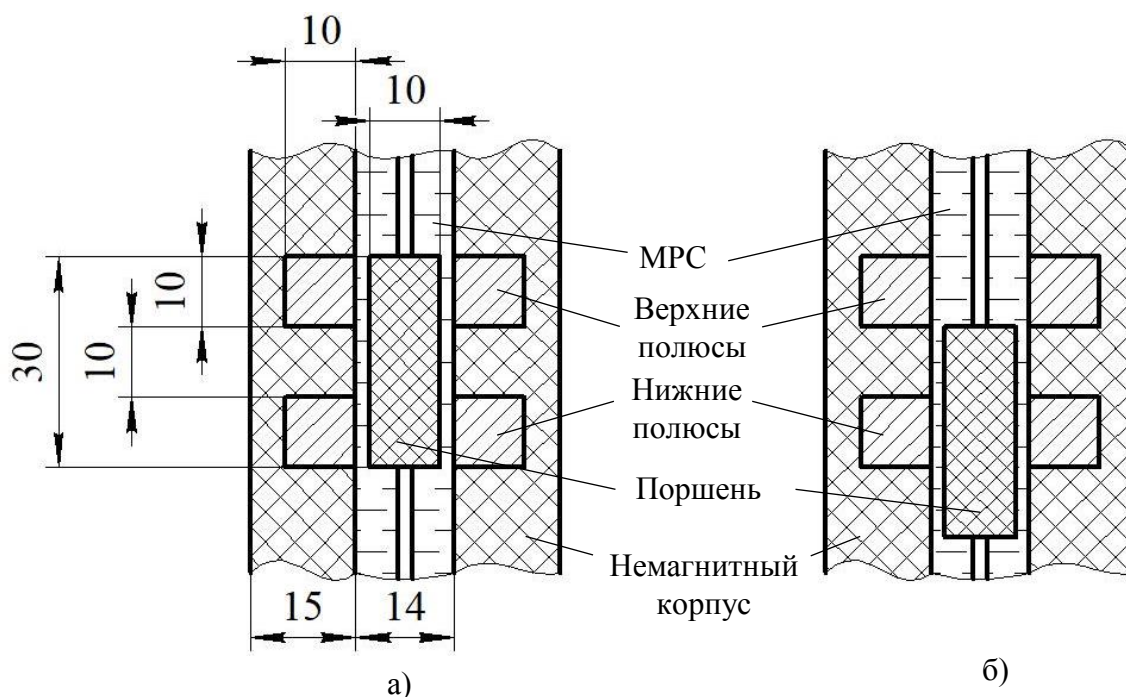


Рисунок 4.6. Положения поршня: а – положение 1; б – положение 2

Для исследования использовалось два конструктивных исполнения поршня, представленные на рисунке 4.7: 1 — поршень с ферромагнитными элементами, 2 — немагнитный поршень. Эти варианты поршня позволяют оценить влияние эффекта магнитной пружины на силовую характеристику ЭМЖД.

Для каждого исполнения поршня проводилась серия экспериментов с пятью значениями частоты колебаний (0,2 Гц, 0,4 Гц, 0,6 Гц, 0,8 Гц, 1,0 Гц) при семи значениях магнитной индукции снаружи демпфера (0 Тл, 0,05 Тл, 0,10 Тл, 0,15 Тл, 0,20 Тл, 0,30 Тл, 0,40 Тл). Испытания проводились при фиксированной амплитуде гармонических колебаний, равной 10 мм. Переходные процессы не учитывались. Эксперименты проводились при комнатной температуре 20 °С.

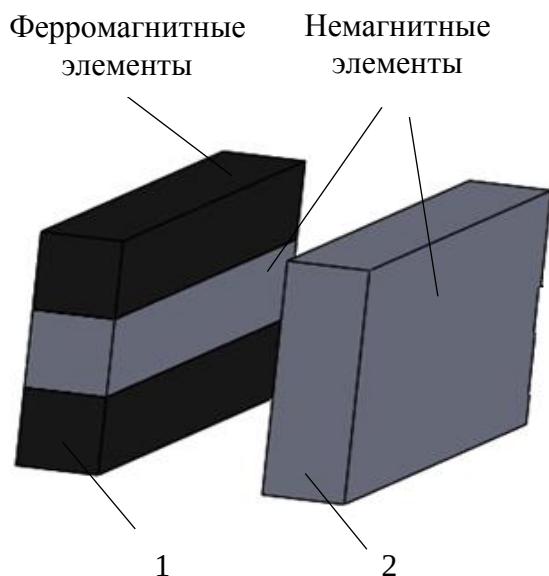


Рисунок 4.7. Конструкции поршня ЭМЖД: 1 – поршень с ферромагнитными элементами, 2 – немагнитный поршень

Кроме того, демпфер испытывался в статических режимах с амплитудой 20 мм, с заполнением и без заполнения МРС.

Из-за сложности измерения магнитной индукции внутри демпфера во время работы её значения определялись по ранее снятой зависимости от индукции снаружи, приведенной на рисунке 4.8. Расположение точек, в которых проводилось измерение магнитной

индукции, показано на рисунке 4.9. Линией 1 на рисунке 4.8 показана зависимость магнитной индукции внутри демпфера в т. 2 от индукции снаружи демпфера в т. 1 для поршня с ферромагнитными элементами. Линией 2 показана зависимость магнитной индукции внутри демпфера в т. 2 от индукции снаружи демпфера в т. 1 для немагнитного поршня. Линией 3 показана зависимость магнитной индукции внутри демпфера в т. 3 от индукции снаружи демпфера в т. 1 для немагнитного поршня. Линией 4 показана зависимость магнитной индукции внутри демпфера в т. 3 от индукции снаружи демпфера в т. 1 для поршня с ферромагнитными элементами.

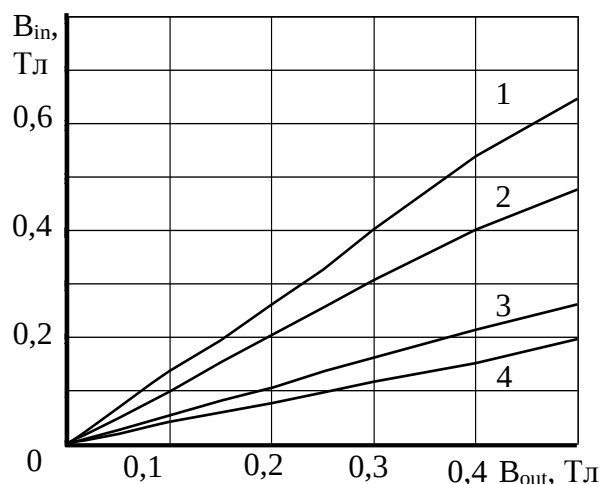


Рисунок 4.8. Зависимость индукции внутри демпфера от индукции снаружи:
1,4 – поршень с ферромагнитными элементами; 2,3 – немагнитный поршень

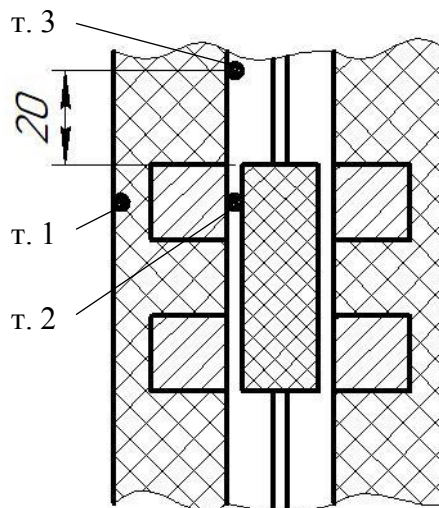


Рисунок 4.9. Точки измерения магнитной индукции

Так как щуп тесламетра немагнитный, измерение магнитной индукции в демпфере, заполненном МРС, будет давать бóльшую погрешность, чем в демпфере без МРС, потому что магнитные силовые линии при заполнении демпфера МРС будут огибать щуп тесламетра по окружающей его жидкости.

На рисунке 4.10 показано построенное по результатам конечно-элементного моделирования распределение магнитной индукции по высоте демпфера на расстоянии 1 мм от его стенки. Точками показаны места расположения щупов тесламетра при измерении индукции и построении зависимостей на рисунке 4.8. Распределение индукции снаружи демпфера (кривая 1) не меняется при заполнении его МЖ. При использовании поршня с ферромагнитными элементами индукция внутри демпфера, заполненного МЖ (рисунок 4.10,б, кривая 3), незначительно повышается, при этом принципиальный вид распределения не меняется. При заполнении магнитной жидкостью демпфера с немагнитным поршнем (рисунок 4.10,а) индукция внутри демпфера сильно перераспределяется, значительно увеличиваясь по краям поршня.

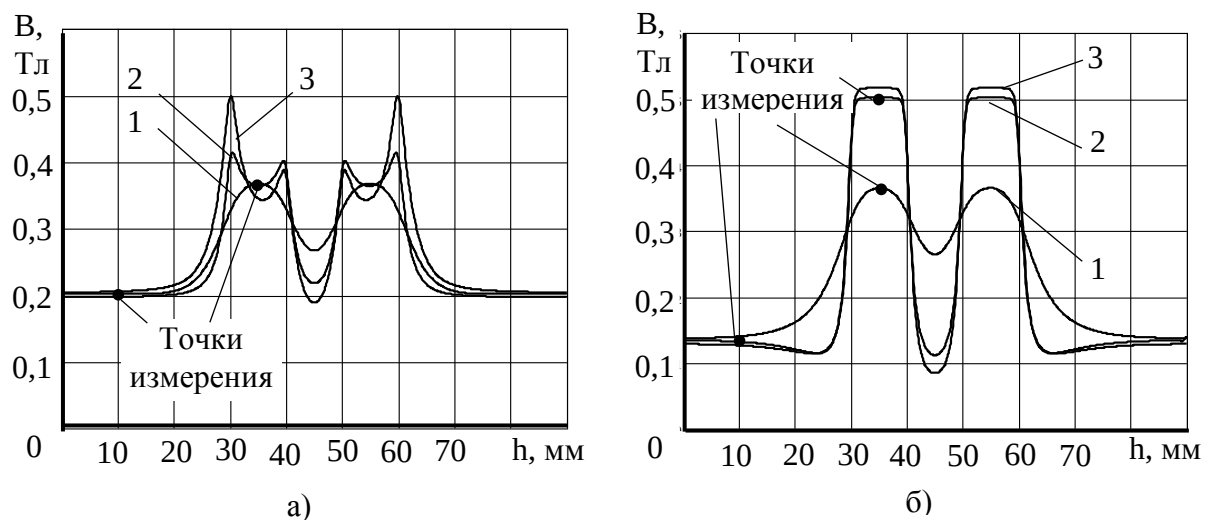


Рисунок 4.10. Распределение магнитной индукции по высоте демпфера с немагнитным поршнем (а) и поршнем с ферромагнитными элементами (б): 1 – индукция снаружи демпфера; 2 – индукция внутри демпфера без МЖ; 3 – индукция внутри демпфера с МЖ

В сравнении с экспериментом погрешность моделирования около 5%, что связано с кривой намагничивания стали и геометрическими погрешностями модели и прототипа.

Так как распределение магнитной индукции по высоте для разных типов поршня кардинально различается, то для возможности сравнения результатов будем использовать среднее значение индукции в области движения поршня, где происходит основная диссипация энергии колебаний. Возьмём среднее значение магнитной индукции на участке от 20 до 70 мм, тем самым отступив на 10 мм вверх и вниз от стальных полюсов корпуса. При индукции в точке измерения снаружи демпфера, равной 0,365 Тл, средние значения внутри демпфера составляют 0,306 Тл для поршня с ферромагнитными элементами и 0,321 Тл для немагнитного поршня. Разность между средними значениями магнитной индукции составляет 5% и практически не меняется при изменении магнитного потока. В дальнейшем при построении графиков и сравнении результатов будем пользоваться индукцией снаружи демпфера как непосредственно измеряемой величиной.

Эксперименты проводились в повторно-кратковременном режиме и изменение температуры не учитывалось.

4.4. Параметры магнитореологической суспензии, использованной при экспериментальных исследованиях электромеханических магнитожидкостных демпферов

МРС, использованная при испытании демпфера, изготовлена в Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики Ивановского государственного энергетического университета. В качестве дисперсионной среды в МРС применялась полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС-4 с динамической вязкостью 48 сСт, в качестве дисперсной фазы — смесь высокодисперсного магнетита со средним диаметром частиц 10 нм и карбонильного железа со средним диаметром частиц 2 мкм (см. рисунок 4.11), взятых в соотношении 1:1. Сочетание высокодисперсных и микрогетерогенных частиц делает суспензию более устойчивой в статическом режиме. Суммарная объемная доля дисперсной фазы в МРС составляет 20%.

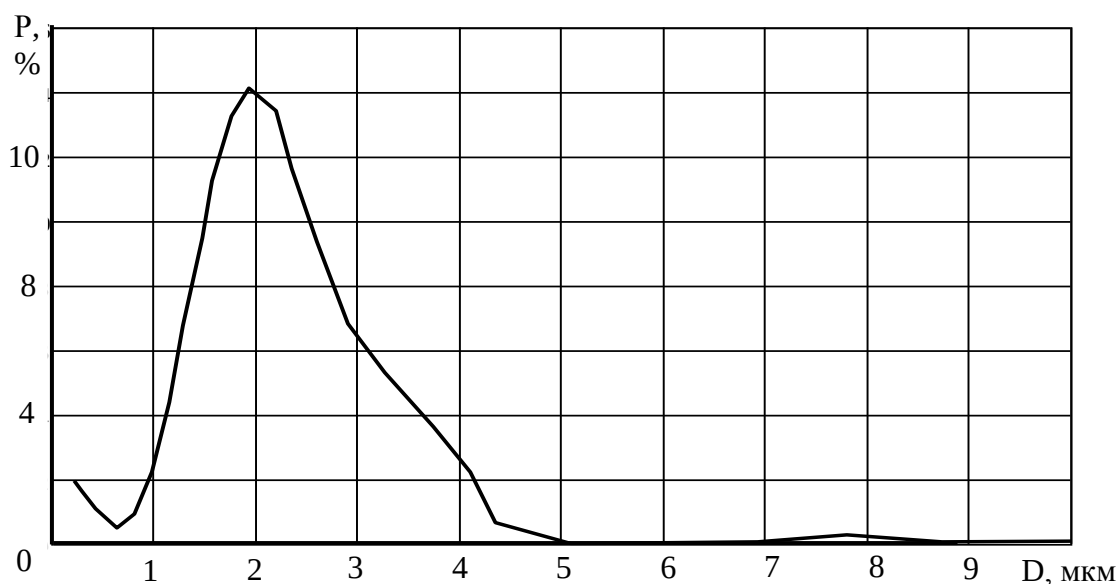


Рисунок 4.11. Распределение размеров частиц в порошке карбонильного железа

На рисунке 4.12 представлена кривая намагничивания МРС, полученная баллистическим методом. При индукции 0,5 Тл МРС насыщается и относительная магнитная проницаемость уменьшается с 2,1 (на начальном участке кривой намагничивания) до 1,4.

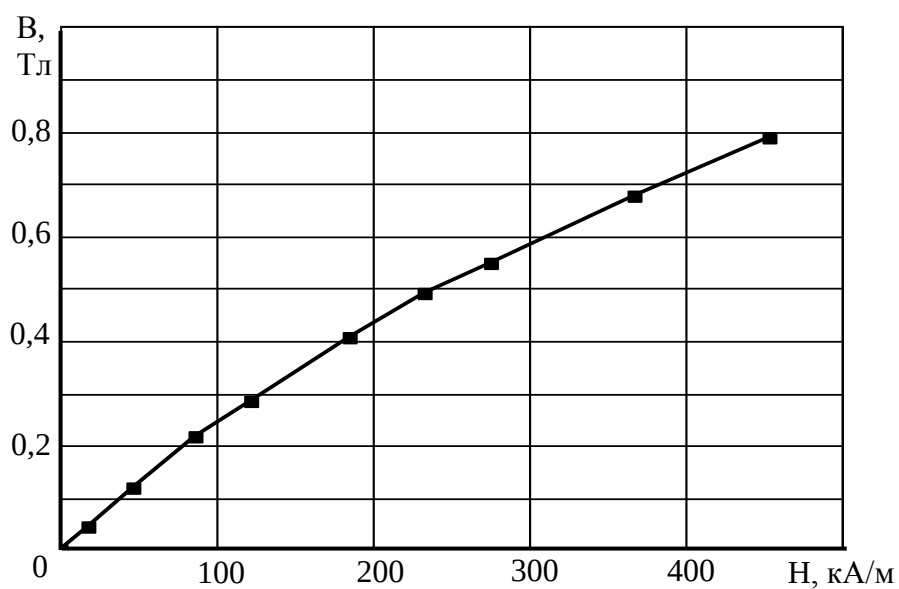


Рисунок 4.12. Кривая намагничивания MPC

Реологические характеристики MPC для разных значений магнитной индукции (рисунок 4.13) получены на ротационном вискозиметре колокольного типа. Из рисунка видно, что касательное напряжение сдвига практически перестаёт изменяться при увеличении магнитной индукции свыше 0,5 Тл.

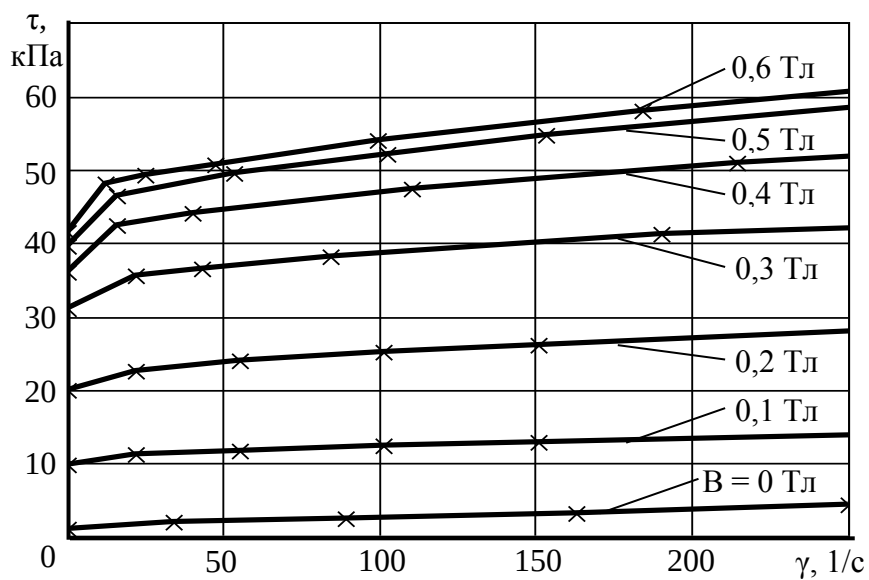


Рисунок 4.13. Реологические характеристики MPC

4.5. Электромеханический магнитожидкостный демпфер с немагнитным поршнем

При проведении экспериментальных исследований первоначально снималась зависимость статической и динамической силы сопротивления ЭМЖД без МРС, что позволило учесть силы трения и перекосов подвижного поршня при отсутствии магнитного поля и при его наличии. Далее ЭМЖД полностью заполнялся МРС и проводились исследования в статических и динамических режимах при отсутствии и наличии магнитного поля. При исследовании статической силы сопротивления поршень демпфера медленно перемещался на 20 мм вверх и вниз от «положения 1» с шагом в 2 мм. Значение силы, действующей на поршень фиксировалось в каждой точке после завершения протекающих гидродинамических процессов. Испытания в динамических режимах проводились при гармонических колебаниях поршня с амплитудой 10 мм относительно «положения 1» и «положения 2». Сила сопротивления демпфера в виде осциллограммы от времени выводилась на ЭВМ. Исследование ЭМЖД с ферромагнитными элементами на поршне проходило аналогичным образом.

Статическая сила сопротивления демпфера в зависимости от положения поршня при разных значениях магнитной индукции показана на рисунке 4.14. Под осью абсцисс показаны соответствующие кривым положения поршня, а направление движения стрелками. Высота $h = 0$ мм соответствует «положению 1». Пунктирной линией показана статическая сила сопротивления демпфера без заполнения МРС. Видно возрастание силы сопротивления на уровне от 10 до 20 мм из-за того, что небольшая несоосность опорных поверхностей штока и отверстий корпуса, полученная при изготовлении, в большей степени проявляется в верхнем положении поршня. Силы механического сопротивления во всех снятых кривых проявляются одинаково, что позволяет учесть их при анализе результатов эксперимента как систематическую ошибку.

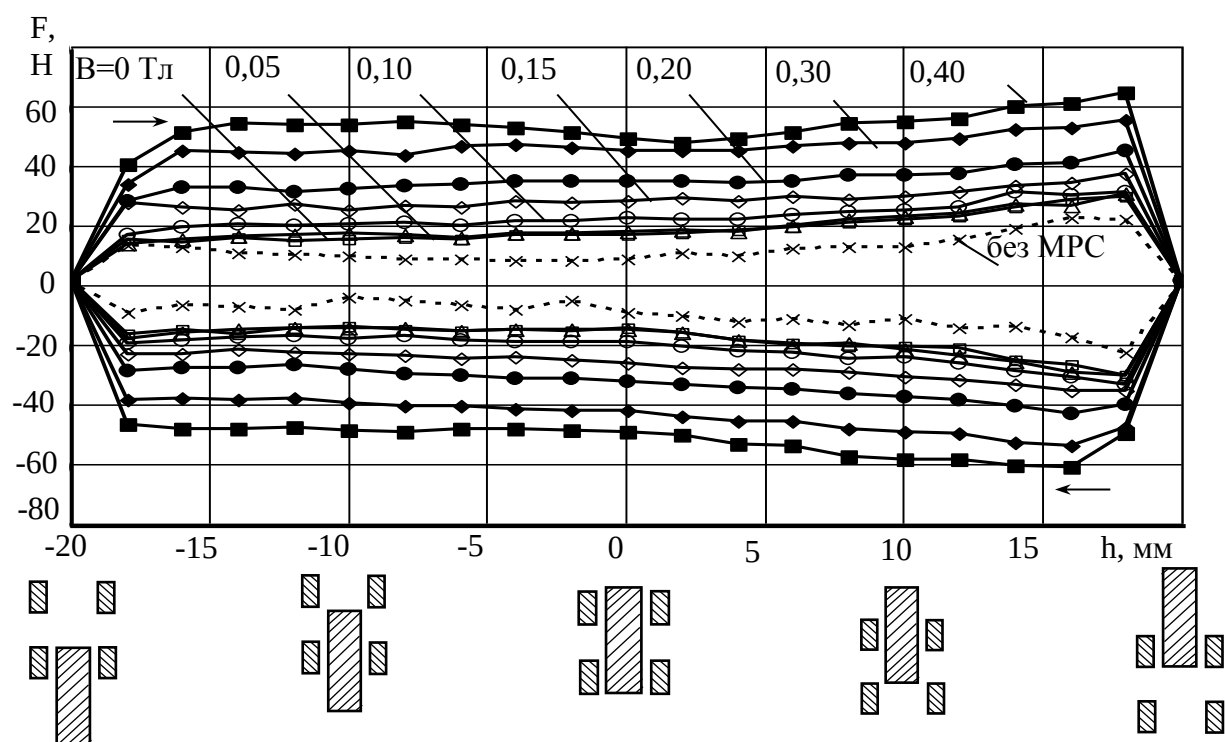


Рисунок 4.14. Зависимость статической силы сопротивления демпфера с MPC от положения немагнитного поршня

Наличие в рабочем зазоре MPC увеличивает сопротивление перемещению поршня в отсутствие магнитного поля в среднем на 8,6 Н. В магнитном поле силы сопротивления перемещению поршня растут по мере увеличения магнитной индукции и предела текучести MPC. Характер изменения сил сопротивления остаётся такой же, как при отсутствии магнитного поля. Только при достижении значений магнитной индукции 0,3 Тл и больше начинает заметно проявляться эффект магнитной пружины. Это выражается в росте силы сопротивления перемещению поршня при его движении вверх, что вызвано уменьшением краевой магнитной проводимости нижнего полюса ($h = -15$ мм), а затем и верхнего. После прохождения торцом поршня половины высоты полюса ($h = -5$ мм) сила сопротивления от магнитной пружины ослабевает и снижается до нуля при $h = 0$ мм, среднее положение поршня. При дальнейшем движении поршня вверх сила магнитной пружины меняет свой знак и стремится вытолкнуть поршень вверх, что проявляется в продолжающемся уменьшении силы движущей поршень вверх

($h = 5$ мм). Однако она заметно меньше силы, связанной с пределом текучести МРС, и при выходе поршня из зазора нижнего полюса практически исчезает.

При нахождении поршня в нулевом положении имеем только сопротивление перемещению поршня, связанное с силой трения и пределом текучести МРС. Из кривых рисунка 4.14 видно, что влияние предела текучести МРС в магнитном поле заметно больше сил от эффекта магнитной пружины при немагнитном поршне. Это заметно из близкого совпадения сил сопротивления от значений магнитной индукции внешнего поля в разных положениях поршня относительно полюсов системы. Только при больших магнитных индукциях (более 0,3 Тл) начинает проявляться отличие сил от положения поршня и полюсов.

Перемещение поршня вниз сопровождается теми же эффектами, что и движение вверх. Только теперь силы магнитной пружины направлены вверх и сначала способствуют быстрому уменьшению модуля силы, перемещающей поршень вниз. Однако они быстро спадают до нуля и после среднего положения поршня практически не проявляются.

Зависимости максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции (рисунок 4.15) и частоты колебаний (рисунок 4.16) построены по осциллограммам изменения силы от времени, представленным на рисунках П1.1 и П1.2 Приложения 1 для трёх значений частоты колебаний. Видно, что максимальная сила зависит от величины магнитной индукции и почти не зависит от частоты колебаний. Однако при увеличении индукции зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебаний, а значит, и от скорости движения поршня, становится более выраженной.

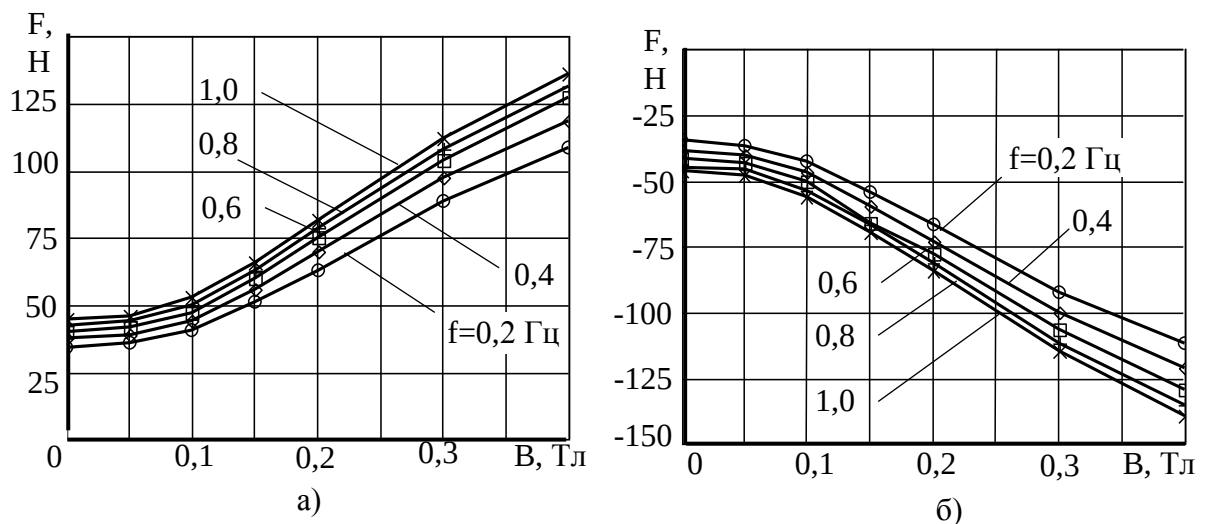


Рисунок 4.15. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции. Немагнитный поршень. а – движение поршня вверх; б – движение поршня вниз

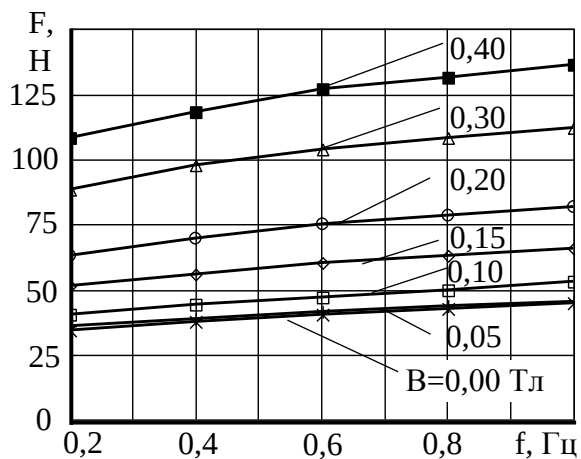


Рисунок 4.16. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебания. Немагнитный поршень

Результаты, представленные на рисунке 4.15, показывают две характерные зоны кривых: первая часть (значения индукции в диапазоне 0-0,05 Тл) представляет собой значения индукции, слишком малые для активации МЖ; вторая зона (значения индукции в диапазоне 0,05-0,4 Тл) представляет собой область, в которой можно управлять силой сопротивления демпфера во время процесса гашения колебаний. Существует ещё одна зона при больших значениях индукции, в которой МЖ приближается к насыщению и не может быть получено заметного увеличения силы. В данных экспериментах она не достигается.

Из рисунка 4.15 видно, что в отсутствие магнитного поля сила демпфирования ЭМЖД (например, при частоте колебаний 0,6 Гц) составляет 35 Н. Это минимальная неконтролируемая демпфирующая сила, которая складывается из сил трения и вязкостных эффектов МЖ. Когда индукция снаружи демпфера достигает 0,4 Тл, максимальная сила сопротивления составляет 125 Н, контролируемое усилие в ней составляет 90 Н.

На рисунке 4.16 показано, что максимальная сила сопротивления демпфера увеличивается с ростом частоты, и, как следствие, скорости движения поршня.

При сравнении максимальных сил сопротивления ЭМЖД для каждого из семи значений магнитной индукции, показанных на рисунке 4.15, с силой сопротивления движению поршня при отсутствии МРС и токов в катушках электромагнита, позволяющей судить о сопротивлении, вызванном силой трения, видно, что сила трения штока о корпус, составляющая до 40% от силы сопротивления демпфера, заполненного МРС, значительно влияет на силу демпфирования при малых значениях магнитной индукции. При более высоких скоростях и при приложении более сильных магнитных полей к демпферу вклад силы трения намного меньше.

Для удобства анализа влияния, которое магнитные усилия оказывают на работу демпфера, на рисунке 4.17 осциллограммы силы сопротивления демпфера сопоставлены с положением поршня относительно полюсов корпуса. Рассмотрим случай, когда среднее положение поршня соответствует «положению 1» (рисунок 4.17, кривая 1). На участке 1-2 сила магнитного тяжения препятствует входу немагнитного поршня в межполюсное пространство, действуя согласно с силой гидродинамического сопротивления, тем самым увеличивая результирующую силу демпфера. На участке 2-3 сила магнитного тяжения выталкивает немагнитный поршень из межполюсного пространства, действует навстречу силе гидродинамического сопротивления МРС, и участок характеристики приобретает спадающий вид. Воздействие сил гидродинамического сопротивления и магнитного тяжения на участке 3-4

аналогично участку 1-2, а на участке 4-5 аналогично участку 2-3. В точках 2 и 4 скорость движения поршня максимальна, а сила магнитного тяжения отсутствует, следовательно, максимум силы определяется только гидродинамической составляющей. В точках 1, 3 и 5 скорость движения поршня равна нулю, изменяется направление движения. Влияние силы магнитного тяжения при этом сглаживается инертностью гидродинамических процессов.

Для случая, когда среднее положение поршня соответствует «положению 2» (рисунок 4.17, кривая 2) процессы описываются следующим образом. На участке 1-2 и 2-3 сила магнитного тяжения препятствует входу немагнитного поршня в межполюсное пространство, действуя согласно с силой гидродинамического сопротивления, тем самым увеличивая результирующую силу демпфера. На участках 3-4 и 4-5 сила магнитного тяжения выталкивает немагнитный поршень из межполюсного пространства, действуя навстречу силе гидродинамического сопротивления МРС, и участок характеристики приобретает спадающий вид. В дополнение к этому изменяется длина части поршня, находящейся в области с большими значениями магнитной индукции, и, как следствие, большей вязкостью МРС. Это вызывает ещё большее уменьшение силы сопротивления на участке 4-5 и увеличение её на участке 1-2.

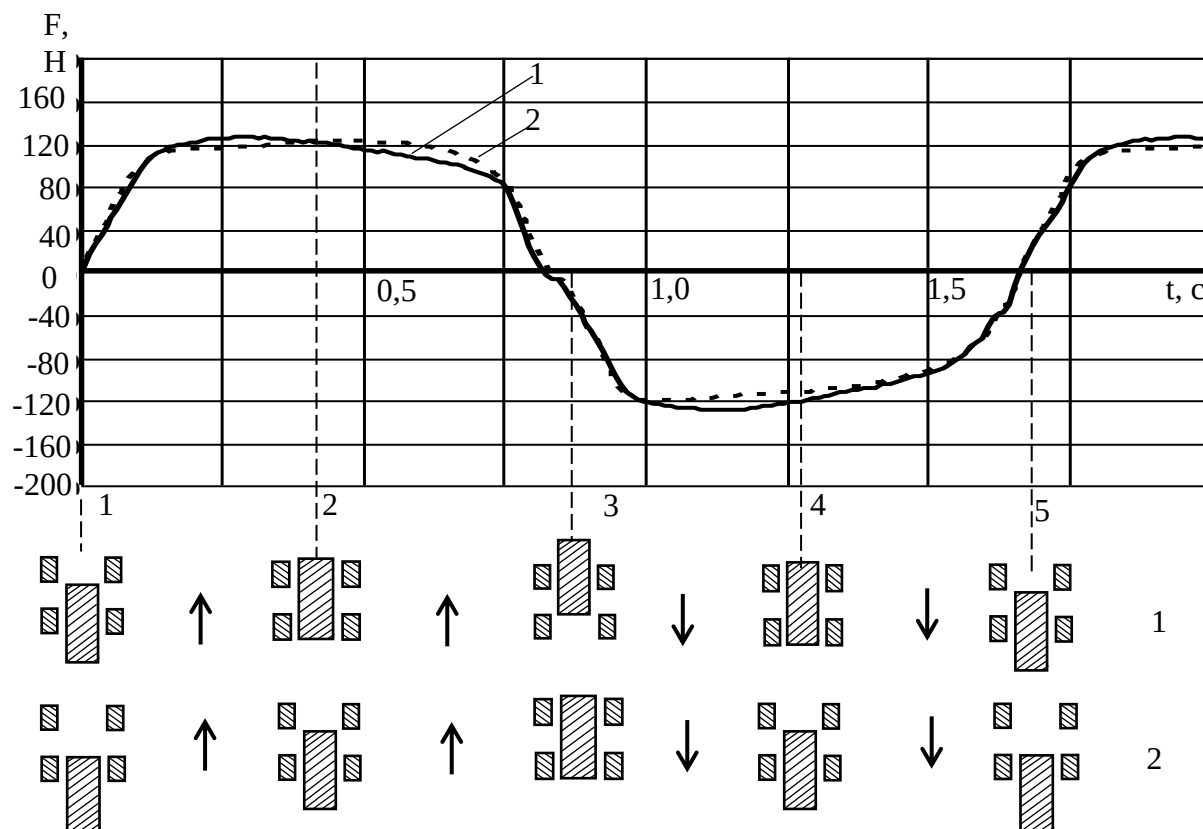


Рисунок 4.17. Зависимость силы сопротивления демпфера при колебательном движении $B = 0,4$ Тл для разных средних положений немагнитного поршня:
кривая 1 – «положение 1»; кривая 2 – «положение 2»

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при высоких значениях магнитной индукции в рабочей зоне, $0,2$ Тл и более, увеличение вязкости МРС и гидродинамическое сопротивление играют основную роль в формировании силовой характеристики демпфера с немагнитным поршнем. Эффект магнитной пружины сказывается на смещении максимальной силы в область внедрения поршня в зазор между полюсами (кривая 2). На значение сил сопротивления движению поршня эффект магнитной пружины при немагнитном поршне влияет слабо.

4.6. Электромеханический магнитожидкостный демпфер с ферромагнитными элементами на поршне

Эффект магнитной пружины более ярко проявляется при использовании поршня с ферромагнитными элементами. Сила трения движущегося штока о направляющие, при использовании поршня с ферромагнитными элементами, получилась меньше, чем у немагнитного поршня, и одинакова в крайних, нижнем и верхнем, положениях поршня.

Статическая сила сопротивления демпфера, не заполненного МРС, в зависимости от положения поршня при разных значениях магнитной индукции показана на рисунке 4.18. Уровень $h=0$ мм соответствует «положению 1». Зависимости снимались для полного цикла колебания с амплитудой 20 мм, чтобы перекрыть все возможные при экспериментах положения поршня. Отсутствие МРС в демпфере позволяет оценить возникающие усилия магнитной пружины без влияния магнитного поля на свойства МРС.

Рассмотрим эту зависимость при значении магнитной индукции 0,4 Тл, как наиболее ярко выраженную. При подъёме поршня вверх сила трения штока препятствует движению поршня и растягивает тензометрический датчик. На уровне от -20 мм до -15 мм к силе трения прибавляется сонаправленная с ней сила магнитного тяжения, препятствующая выходу ферромагнитного элемента поршня из межполюсного пространства. На уровне от -15 мм до -10 мм на уменьшение силы трения накладывается увеличение силы, втягивающей ферромагнитные элементы поршня в межполюсные пространства корпуса и сила сопротивления демпфера начинает уменьшаться. На уровне -10 мм сила, действующая на тензометрический датчик, меняет свой знак, так как сила магнитного тяжения, втягивающая ферромагнитные элементы поршня в межполюсные пространства и толкающая поршень по направлению движения, превышает силу трения. При дальнейшем подъёме поршня сила магнитного тяжения

возрастает до максимальных значений при положении поршня на уровне -5 мм. После этого она начинает уменьшаться, так как снижается насыщение ферромагнитных элементов поршня и перераспределения магнитного потока при перемещении поршня практически не происходит. На уровне 0 мм ферромагнитные элементы поршня находятся напротив полюсов корпуса, и сила магнитного тяжения удерживает их в этом положении, сила, действующая на тензодатчик практически пропадает. Остальные участки описываются аналогичным образом.

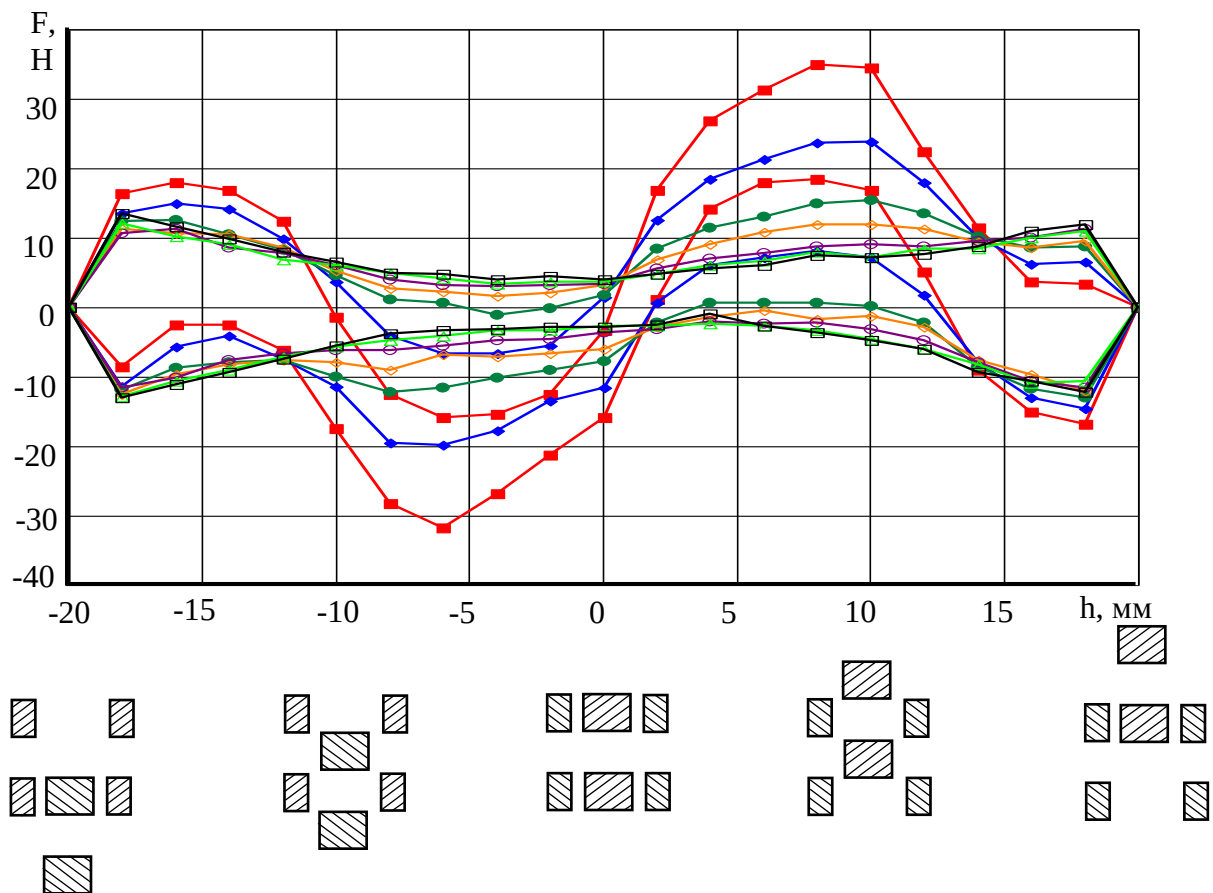


Рисунок 4.18. Зависимость статической силы сопротивления демпфера с ферромагнитными элементами на поршне от положения поршня. Без заполнения демпфера MPC

Заполнение модели MPC ведёт к смягчению проявления эффекта магнитной пружины (рисунок 4.19). Вязкость MPC в магнитном поле возрастает и при смещении поршня в рабочей области от -10 мм до 0 мм сигнал тензодатчика остаётся положительным. Однако характер изменения силы магнитной пружины аналогичен рассмотренному: сначала она

направлена вниз и увеличивает движущую силу; затем меняет направление, что проявляется в уменьшении результирующей силы; после нулевого положения сильное увеличение направленной вниз силы и постепенное её снижение до нуля. Магнитовязкостные силы уменьшаются по мере выхода поршня из зоны концентрации магнитных силовых линий полюсами корпуса.

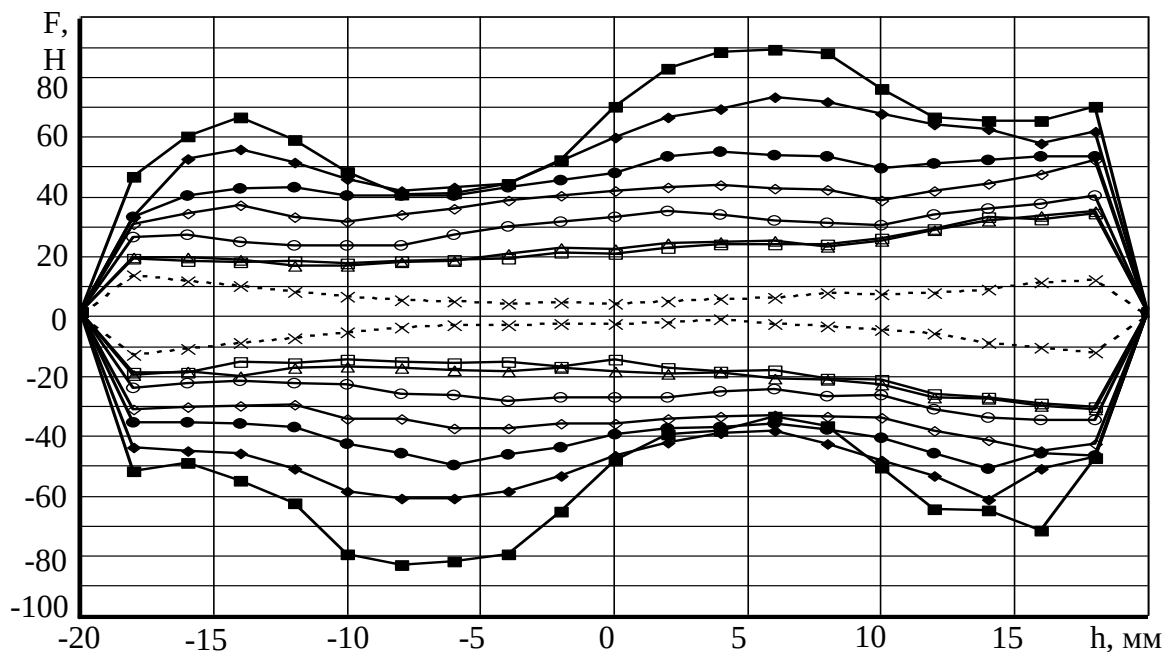


Рисунок 4.19. Зависимость статической силы сопротивления демпфера с МРС от положения поршня

Зависимости максимальной силы сопротивления демпфера для случая, когда среднее положение поршня соответствует «положению 1», от величины магнитной индукции (рисунок 4.20) и частоты колебаний (рисунок 4.21) построены по осциллограммам изменения силы от времени, представленным на рисунке П1.3 в приложении 1 для трёх значений частоты колебаний. Видно, что максимальная сила зависит от величины магнитной индукции и почти не зависит от частоты колебаний. Однако при увеличении индукции зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебаний, а значит, и от скорости движения поршня, усиливается.

При этом следует отметить, что в «положении 1» скорость движения поршня максимальна и на поршень не действует сила магнитного тяжения, так что максимум силы определяется только гидродинамическими процессами.

Из рисунка 4.20 видно, что в отсутствие магнитного поля сила демпфирования ЭМЖД (например, при частоте колебаний 0,6 Гц) составляет 35 Н. Это минимальная неконтролируемая демпфирующая сила, которая складывается из сил трения и вязкостных эффектов МЖ. Когда индукция снаружи демпфера достигает 0,4 Тл, максимальная сила сопротивления составляет 150 Н, в которой контролируемое усилие составляет 115 Н. Значения максимальной силы при движении поршня вверх и вниз практически одинаковые.

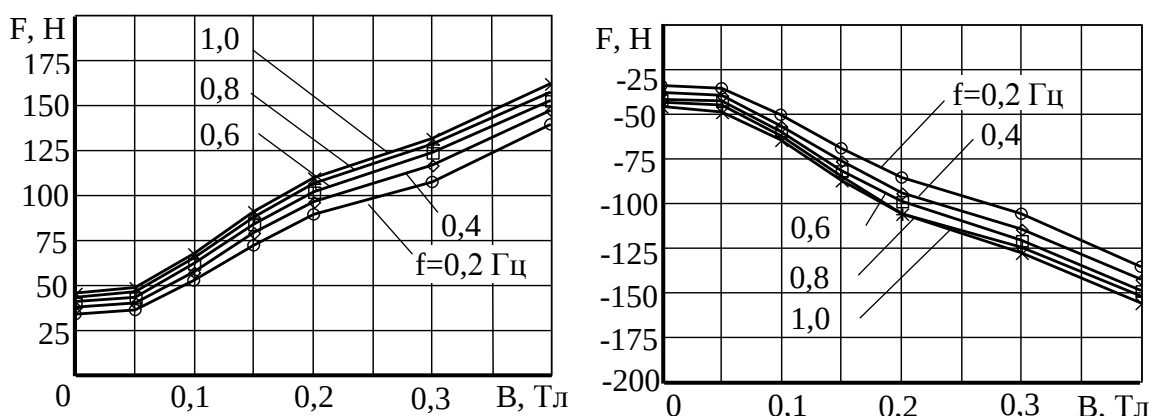


Рисунок 4.20. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции (положение 1) а – движение поршня вверх; б – движение поршня вниз

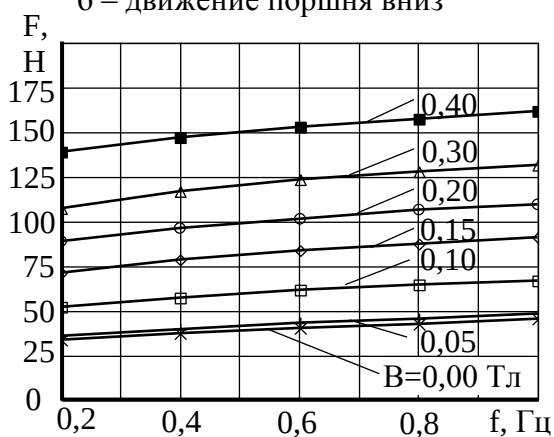


Рисунок 4.21. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебания (положение 1)

Зависимости максимальной силы сопротивления демпфера для случая, когда среднее положение поршня соответствует «положению 2», от значения магнитной индукции (рисунок 4.22) и частоты колебаний (рисунок 4.23) построены по осциллограммам изменения силы от времени, представленным на рисунке П1.4 приложения 1 для трёх значений частоты колебаний. Видно,

что максимальная сила зависит от величины магнитной индукции и почти не зависит от частоты колебаний. Однако при увеличении индукции зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебаний, а значит, и от скорости движения поршня, усиливается.

Из рисунка 4.22 видно, что в отсутствии магнитного поля сила демпфирования ЭМЖД (например, при частоте колебаний 0,6 Гц) составляет 35 Н. Эта сила одинакова как при движении поршня вверх (рисунок 4.22,а), так и вниз (рисунок 4.22,б). Когда индукция снаружи демпфера достигает 0,4 Тл, максимальная сила сопротивления при движении поршня вверх, составляет 155 Н, контролируемое усилие в ней составляет 120 Н. При движении поршня вниз максимальная сила сопротивления составляет 185 Н при контролируемом усилии 150 Н.

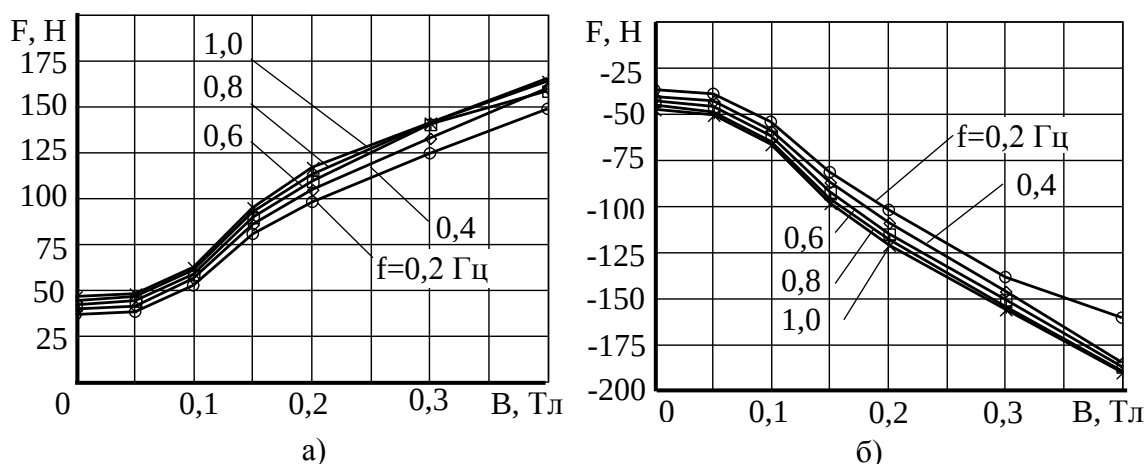


Рисунок 4.22. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции (положение 2) а – движение поршня вверх; б – движение поршня вниз

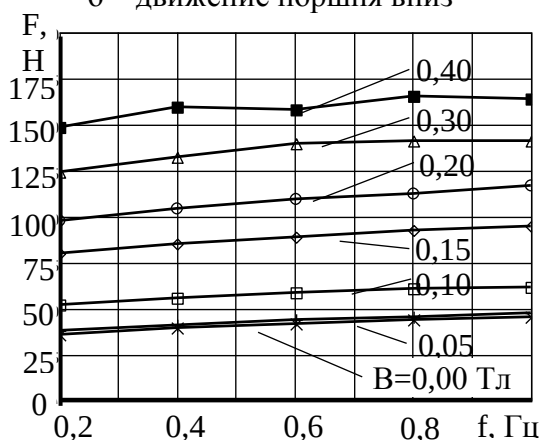


Рисунок 4.23. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от частоты колебания (положение 2). Движение поршня вверх

Для удобства анализа влияния, которое магнитные усилия оказывают на работу демпфера, на рисунке 4.24 осциллограммы силы сопротивления демпфера сопоставлены с положением поршня относительно полюсов корпуса. Рассмотрим случай, когда среднее положение поршня соответствует «положению 1» (рисунок 4.24, кривая 1). На участке 1-2 сила магнитного тяжения пытается втянуть стальные полюса поршня в межполюсное пространство, действуя в направлении, противоположном силе гидродинамического сопротивления и тем самым уменьшая результирующую силу демпфера. На участке 2-3 сила магнитного тяжения препятствует выходу полюсов поршня из межполюсного пространства, действует сонаправленно с силой гидродинамического сопротивления МРС, и участок характеристики приобретает выпуклую форму. При движении поршня вниз воздействие сил гидродинамического сопротивления и магнитного тяжения на участке 3-4 аналогично участку 1-2, а на участке 4-5 аналогично участку 2-3. В точках 2 и 4 скорость движения поршня максимальна, а сила магнитного тяжения отсутствует, следовательно, максимум силы определяется только гидродинамической составляющей. В точках 1, 3 и 5 скорость движения поршня равна нулю и изменяется направление движения. Влияние силы магнитного тяжения при этом сглаживается инертностью гидродинамических процессов.

Для случая, когда среднее положение поршня соответствует «положению 2» (рисунок 4.24,б) взаимное влияние магнитных и гидродинамических процессов отличается. На участке 1-2 сила магнитного тяжения препятствует выходу верхнего полюса поршня из межполюсного пространства, действует сонаправленно с силой гидродинамического сопротивления МРС и увеличивает результирующую силу сопротивления демпфера. В конце участка, ближе к точке 2, сила магнитного тяжения уменьшается, так как на нижний стальной элемент поршня начинают оказывать воздействие нижние полюса корпуса, пытаясь вытянуть его вверх, по направлению движения. На участке 2-3 сила магнитного тяжения пытается

втянуть стальные полюса поршня в межполюсное пространство, действуя в противоположном направлении относительно силы гидродинамического сопротивления, тем самым уменьшая результирующую силу демпфера. При этом сила гидродинамического сопротивления демпфера на участке 2-3 увеличивается из-за увеличения поверхности поршня в зоне больших индукций. В точке 3 магнитные усилия отсутствуют. На участке 3-4 сила магнитного тяжения препятствует выводу стальных полюсов поршня из межполюсного пространства, тем самым увеличивая результирующую силу сопротивления демпфера. На участке 4-5 сила магнитного тяжения втягивает стальной полюс поршня в межполюсное пространство, тем самым действуя навстречу силе гидродинамического сопротивления и уменьшая результирующую силу сопротивления демпфера. Вместе с этим уменьшается поверхность поршня, находящаяся в зоне больших индукций, и сила сопротивления демпфера ослабевает ещё сильнее.

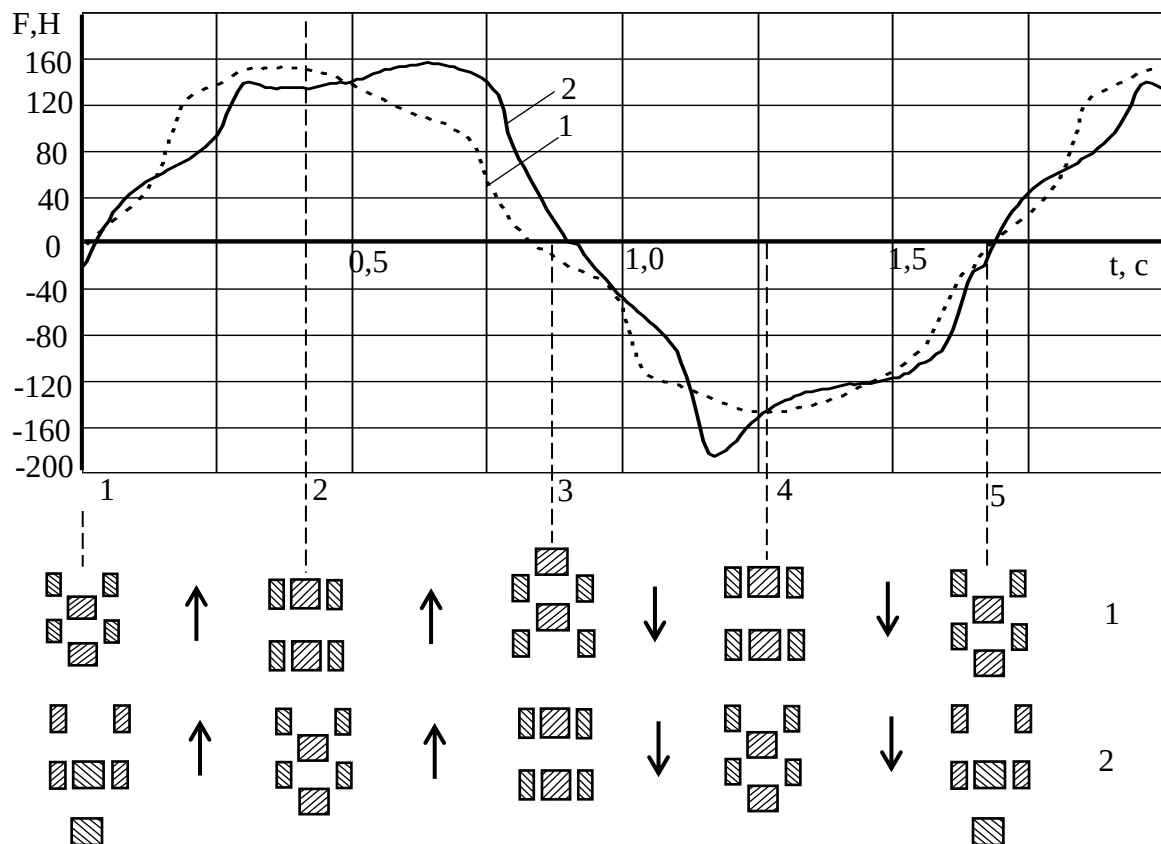


Рисунок 4.24. Зависимость силы сопротивления демпфера при колебательном движении $B = 0,4 \text{ Тл}$ для разных средних положений поршня с ферромагнитными элементами: кривая 1 – «положение 1»; кривая 2 – «положение 2»

Таким образом, из полученных экспериментальных данных видно, что использование эффекта магнитной пружины расширяет возможности по формированию силы сопротивления МЖД. Поршень из немагнитного материала вызывает слабое действие сил магнитной пружины по сравнению с магнитовязкостными силами. Эффект магнитной пружины ярко проявляется у поршня с ферромагнитными элементами. При малых скоростях перемещения поршня силы магнитной пружины и магнитовязкостные силы сопоставимы. Следовательно, в заключительной стадии гашения колебаний, когда скорость перемещения поршня падает и вязкостное демпфирование почти исчезает, на первый план выходят силы магнитной пружины. Их использование позволит повысить эффективность демпфирования колебаний при малых амплитудах и частотах колебаний.

4.7. Силовые характеристики электромеханического магнитожидкостного демфера

На рисунке 4.25 показаны зависимости силы сопротивления ЭМЖД от скорости движения поршня для полного цикла гармонического колебания с амплитудой 10 мм и частотой 0,6 Гц при индукции 0,4 Тл для разных исполнений поршня. Они являются мерой энергии, рассеиваемой демпфером. На рисунке 4.26 показаны зависимости силы сопротивления ЭМЖД от смещения поршня для полного цикла гармонического колебания с амплитудой 10 мм и частотой 0,6 Гц при индукции 0,4 Тл, которые указывают на величину работы, выполняемой демпфером [56]. Зависимости силы от скорости и смещения поршня для разных частот колебаний и магнитных индукций представлены в приложении 1 на рисунках П1.5 – П1.12.

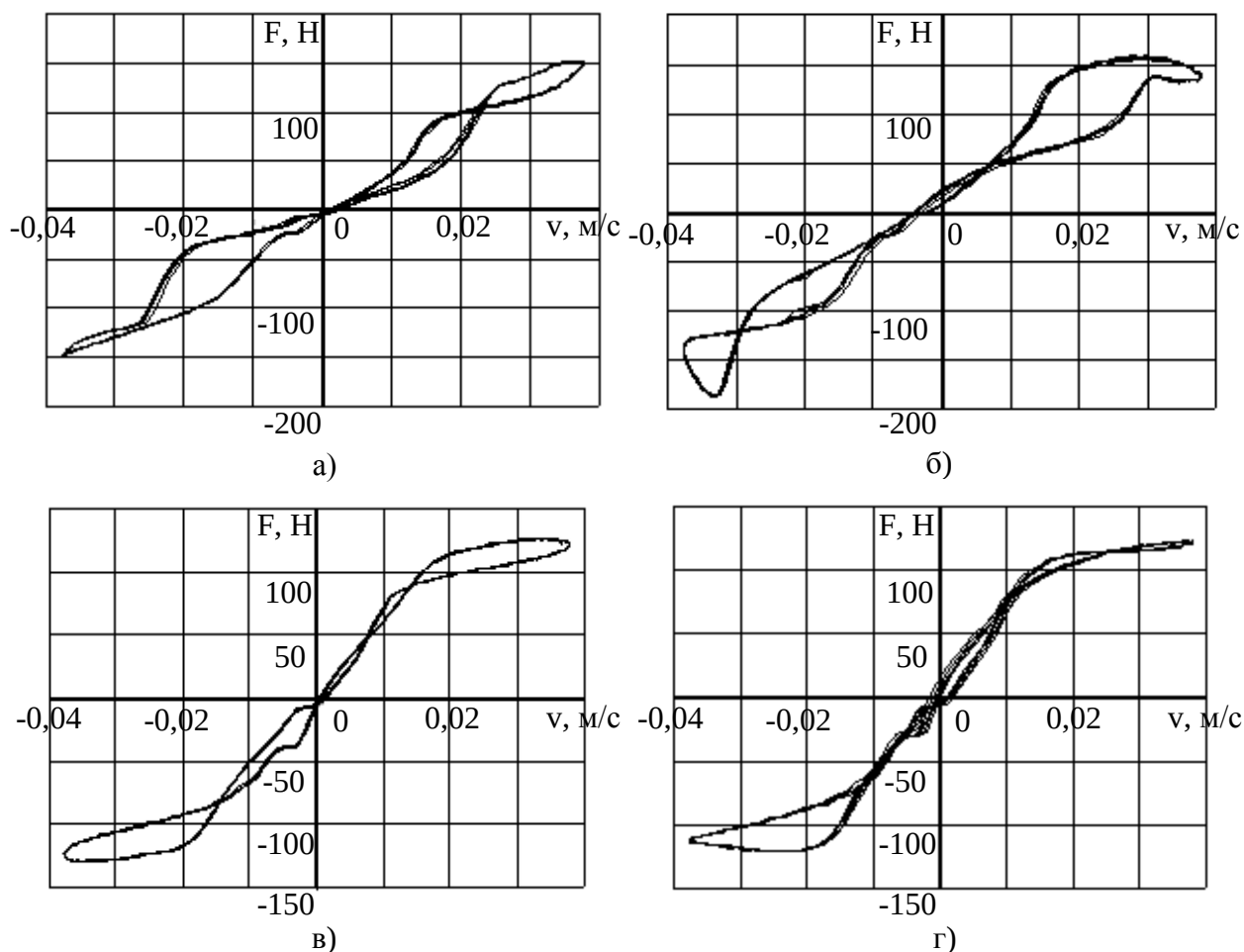


Рисунок 4.25. Зависимости силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня при индукции 0,4 Тл и частоте колебаний 0,6 Гц: а – чередующиеся полюсы на поршне, «положение 1»; б – чередующиеся полюсы на поршне, «положение 2»; в – немагнитный поршень, «положение 1»; г – немагнитный поршень, «положение 2»

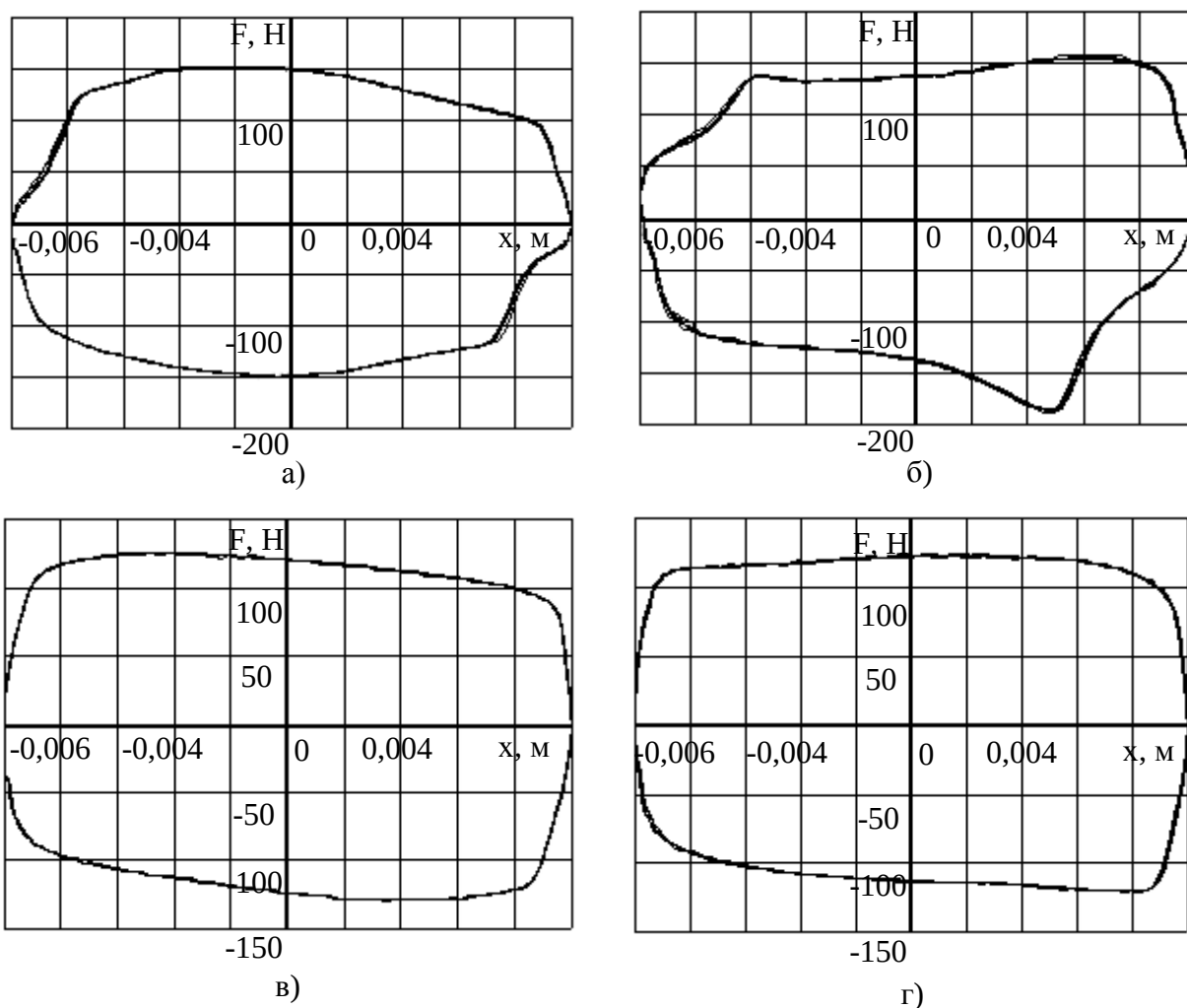


Рисунок 4.26. Зависимости силы сопротивления демпфера от смещения поршня при индукции 0,4 Тл и частоте колебаний 0,6Гц: а – чередующиеся полюсы на поршне, «положение 1»; б – чередующиеся полюсы на поршне, «положение 2»; в – немагнитный поршень, «положение 1»; г – немагнитный поршень, «положение 2»

Заметим, что с течением времени зависимости силы от смещения поршня движутся по часовой стрелке, а петли зависимости силы от скорости против часовой стрелки. Хотя в графиках гистерезиса это не очевидно, такое временное поведение можно определить из экспериментальных осциллограмм.

На рисунках П1.5 – П1.12 видно влияние изменения величины магнитной индукции на силовую характеристику. При отсутствии магнитного поля ЭМЖД в основном проявляет характеристики чисто вязкостного устройства (т. е. зависимость силы от смещения приблизительно эллиптическая, а зависимость силы от скорости почти линейна). По мере увеличения магнитной индукции внутри ЭМЖД сила, необходимая для

течения МРС в демпфере, также растёт, а в петлях гистерезиса начинает проявляться пластическое поведение. Максимальная сила демпфирования возрастает и с ростом частоты колебаний из-за увеличения вязкости при большей скорости сдвига МРС в зазоре демпфера.

Для сравнения результатов, получаемых при конечно-элементном моделировании с экспериментальными данными, построена модель ЭМЖД без полюсов на корпусе для устранения влияния эффекта магнитной пружины. При этом использовался поршень с чередующимися стальными участками на поршне. Осциллограммы колебаний, а также зависимости силы сопротивления от скорости и положения поршня для разных частот колебаний и индукций магнитного поля приведены в приложении 1 на рисунках П1.13 – П1.15. На рисунке 4.27 сплошными линиями показаны силовые характеристики, полученные в результате обработки экспериментальных данных, штриховыми линиями показаны силовые характеристики, получаемые при конечно-элементном моделировании.

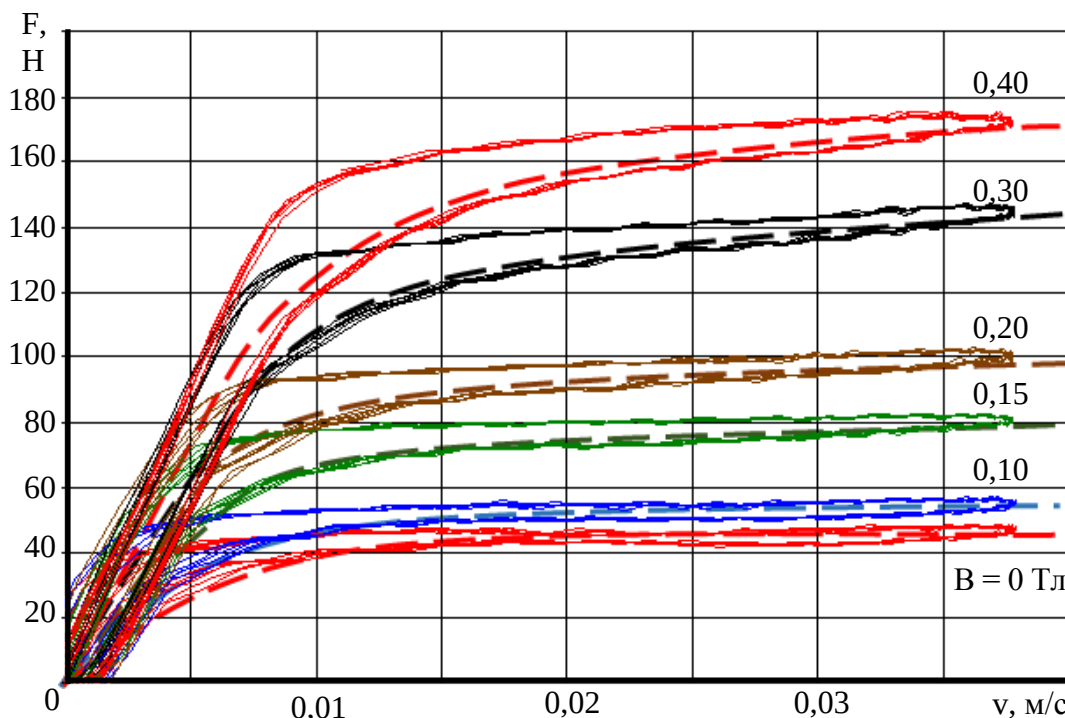


Рисунок 4.27 Результаты конечно-элементного и экспериментального исследований

При анализе зависимостей видно хорошее совпадение результатов конечно элементного моделирования с экспериментальными данными.

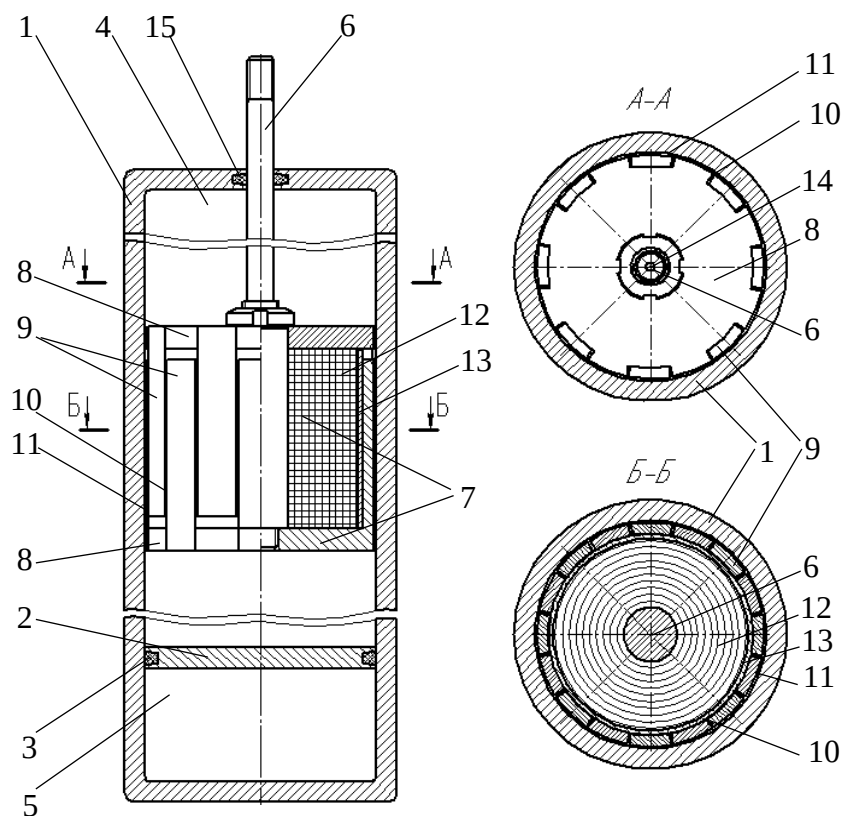
Отклонение от средней линии петли гистерезиса реальной силовой характеристики не превышает 7 %. Недостатком аналитической и конечно-элементной модели является взаимно однозначное соответствие между силой и скоростью движения поршня. В качестве направления дальнейшей работы можно рассматривать учёт при конечно-элементном моделировании гистерезиса в силовых характеристиках ЭМЖД.

4.8 Совершенствование конструкций электромеханического магнитожидкостного демпфера

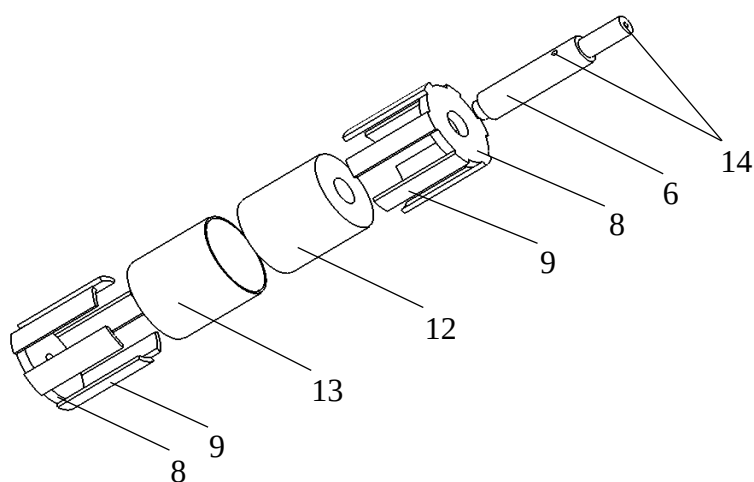
По результатам диссертационного исследования в соавторстве были разработаны конструкции ЭМЖД, позволяющие повысить эффективность гашения колебаний.

ЭМЖД, показанный на рисунке 4.28,*а* состоит из немагнитного корпуса 1 и разделительного поршня 2 с уплотнительным кольцом 3. Разделительный поршень делит корпус на две камеры: рабочую 4, заполненную МЖ, и компенсационную 5, заполненную воздухом или азотом под давлением, обеспечивающим необходимую силовую характеристику демпфера. В рабочей камере движется шток 6 с поршнем 7, состоящим из двух полюсных дисков 8 с образующими систему чередующихся полюсов встречно направленными полюсными пальцами 9 и 10, установленными с зазорами между ними для перетекания МЖ при движении поршня. Изображение поршня 7 представлено на рисунке 4.28,*б*. В целях уменьшения магнитного потока рассеяния пальцы 9 одного из полюсных дисков 8 не доходят до другого полюсного диска 8. Поршень 7 и немагнитный корпус 1 разделены зазором между пальцами и корпусом 11, где также может перемещаться МЖ, на которую воздействует магнитное поле поршня. В зазорах 10 и 11 текущая МЖ находится под воздействием магнитного поля поршня 7. В пространстве, ограниченном полюсными пальцами 9 и штоком 6, помещена катушка

управления 12, отделённая от области протекания МЖ немагнитным цилиндром 13. Катушка управления 12 подсоединяется к источнику питания проводами, выведенными через отверстие 14 в штоке. Для сохранения давления в рабочей камере 4 и предотвращения выплёскивания МЖ в зазоре между корпусом 1 и штоком 6 располагается уплотнительное кольцо 15.



а)



б)

Рисунок 4.28 ЭМЖД а – общий вид; б – поршень

В зависимости от технологии изготовления и требуемых эффектов при работе возможно несколько конструктивных исполнений полюсных пальцев 9, которые показаны на рисунке 4.29. На рисунке 4.29,а один полюсный диск 8 имеет полюсные пальцы 9 прямоугольного сечения, а другой трапецеидального, что позволяет получить равномерный зазор между полюсными пальцами 10. На рисунке 4.29,б оба полюсных диска 8 имеют одинаковые полюсные пальцы 9 прямоугольного сечения, что обеспечивает идентичность обоих полюсов и упрощение технологии их изготовления. На рисунке 4.29,в оба полюсных диска 8 имеют одинаковые полюсные пальцы 9 и 10 трапецеидального сечения, что позволяет изготавливать их

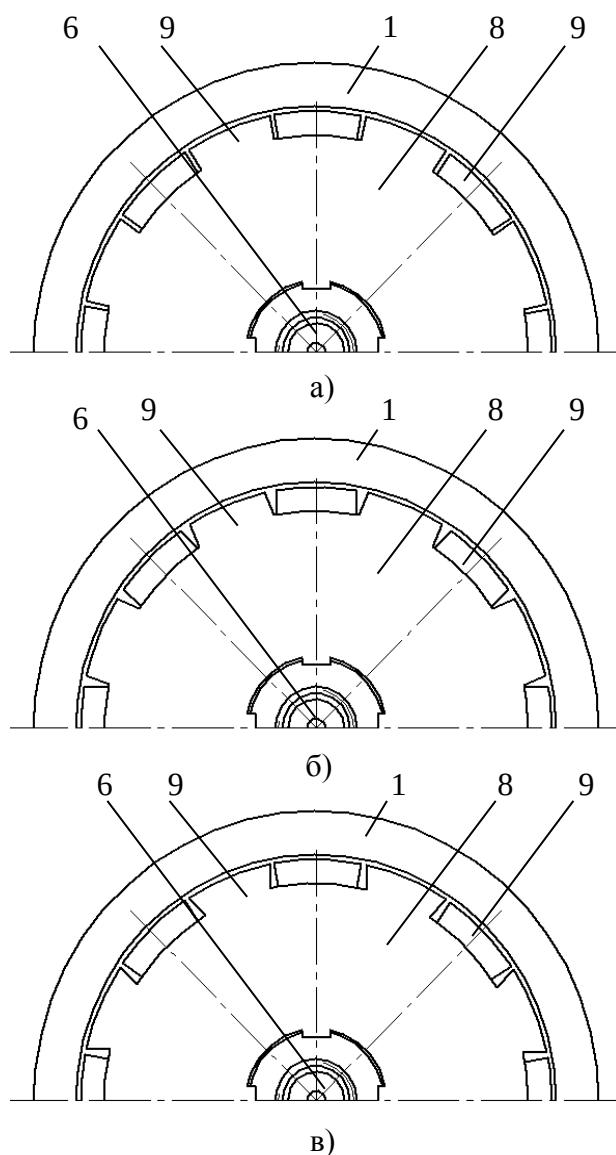


Рисунок 4.29 Варианты исполнения поршня ЭМЖД

фрезерованием одной фрезой и создаёт неравномерный зазор между полюсными пальцами, уменьшающийся к наружной поверхности поршня 7, что способствует увеличению силы центрирования.

Техническим результатом от использования предлагаемого ЭМЖД является увеличение диапазона изменения силовой характеристики демпфера вследствие увеличения максимальной напряжённости магнитного поля в зазоре между пальцами из-за повышения коэффициента использования создаваемого магнитного потока, увеличения рабочего объёма МЖ, находящегося под воздействием управляющего

магнитного поля, увеличения длины каналов, в которых на МЖ воздействует магнитное поле. Срок службы ЭМЖД увеличивается вследствие устранения фрикционного взаимодействия между движущимся поршнем и немагнитным корпусом благодаря эффекту самоцентрирования магнитного поршня в немагнитном корпусе при наличии между ними МЖ. Данная конструкция защищена патентом №2506476 от 10.02.2014 [75].

ЭМЖД, показанный на рисунке 4.30 состоит из магнитопроводящего кожуха 1 и немагнитного корпуса 2 с МЖ 3. На полюсах из магнитопроводящего материала 4 размещены катушки управления 5,

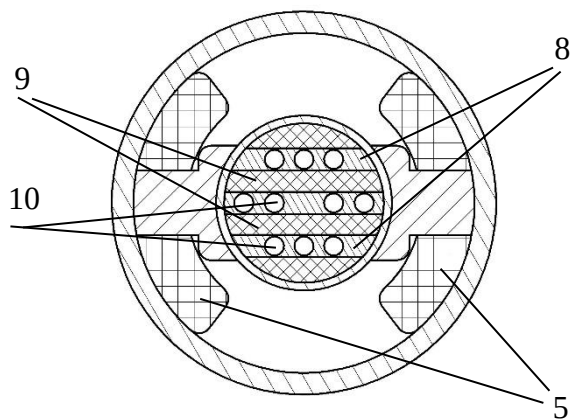
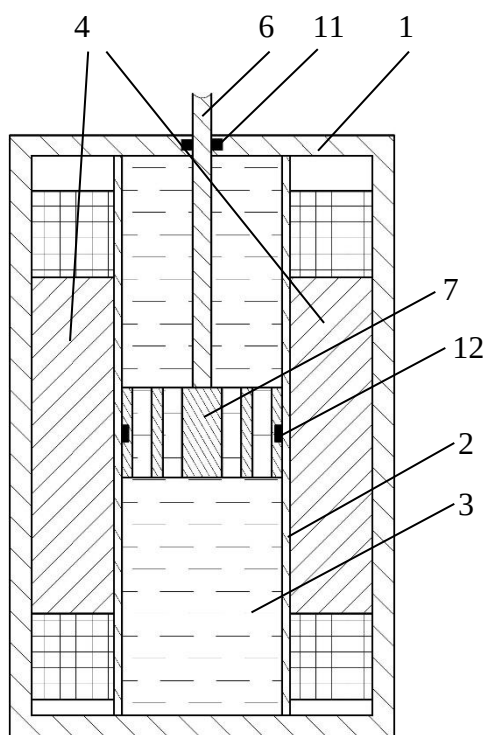


Рисунок 4.30 ЭМЖД с каналами в поршне

служащие для создания изменяемого магнитного поля. Поршень 7 набран из пластин с высокой 8 и с низкой 9 магнитной проводимостью. Поршень 7 размещён так, что пластины ориентированы вдоль магнитной оси полюсов 4. В пластинах с высокой магнитной проводимостью 8 выполнены каналы для протекания МЖ 10. Между штоком и корпусом размещено уплотнительное кольцо 11. В зазоре между поршнем 7 и корпусом 2 установлено нагнетательное кольцо 12.

Техническим результатом от использования предлагаемого устройства является увеличение диапазона изменений силовой характеристики магнитожидкостного амортизатора, повышение эффективности гашения колебаний.

Данная конструкция защищена патентом №2550793 от 14.04.2015 [76].

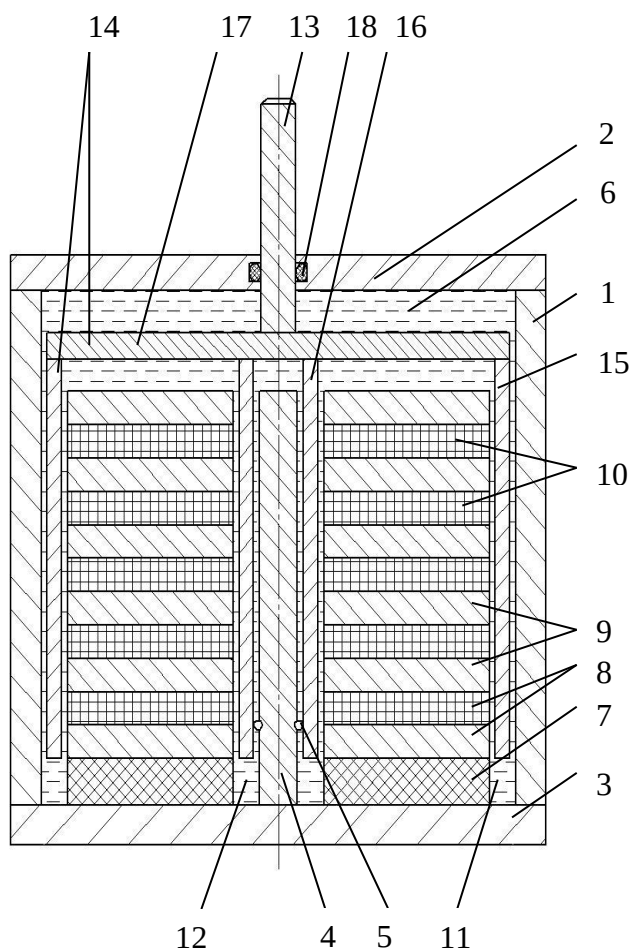


Рисунок 4.31 ЭМЖД с куполообразным поршнем

На рисунке 4.31 изображено поперечное сечение ЭМЖД с куполообразным подвижным элементом в первом варианте исполнения. Он состоит из ферромагнитного корпуса 1, выполненного в форме цилиндра, снабжённого с торцов верхней 2 и нижней 3 крышками. По центру нижней крышки 3 установлен ферромагнитный стержень 4. На поверхности ферромагнитного стержня выполнена кольцевая канавка, в которую помещены сферические тела качения 5. Ферромагнитный корпус 1 заполнен МЖ 6. В ферромагнитном корпусе 1

на немагнитном диске 7, закреплённом на нижней крышке 3, расположена магнитная система 8, состоящая из ферромагнитных полюсов 9, выполненных в форме кольца, и размещённых между ферромагнитными полюсами 9 катушек управления 10. Ферромагнитный корпус 1 и магнитная система 8 образуют внешний рабочий зазор 11, заполненный магнитной жидкостью 6. Магнитная система 8 и ферромагнитный стержень 4 образуют внутренний рабочий зазор 12, заполненный магнитной жидкостью 6. В ферромагнитном корпусе 1 с возможностью движения установлен шток 13 с поршнем 14. Поршень состоит из внешнего немагнитного цилиндра 15, расположенного во внешнем рабочем зазоре 11, и внутреннего немагнитного цилиндра 16, расположенного во внутреннем рабочем зазоре 12, закреплённых на немагнитном основании 17. Для сохранения давления и предотвращения

выплёскивания МЖ в зазоре между ферромагнитным корпусом 1 и штоком 13 располагается уплотнительное кольцо 18. На поверхности ферромагнитного стержня выполнена кольцевая канавка, в которую помещены сферические тела качения 19.

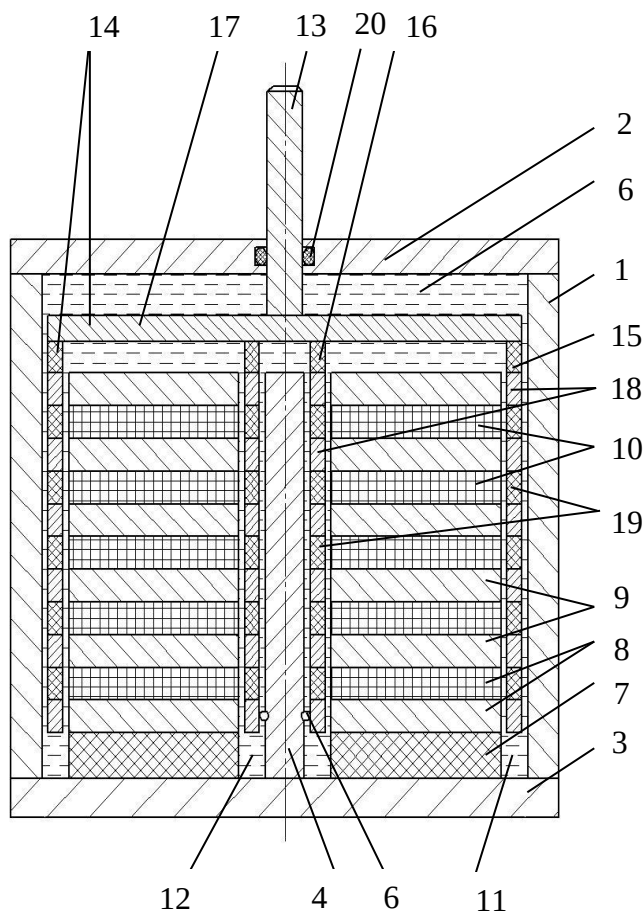


Рисунок 4.32 ЭМЖД с использованием эффекта магнитной пружины

На рисунке 4.32 изображено поперечное сечение ЭМЖД с куполообразным подвижным элементом во втором варианте исполнения. Он состоит из ферромагнитного корпуса 1, выполненного в форме цилиндра, снабжённого с торцов верхней 2 и нижней 3 крышками. По центру нижней крышки 3 установлен ферромагнитный стержень 4. На поверхности ферромагнитного стержня выполнена кольцевая канавка, в которую помещены сферические тела качения 5. Ферромагнитный корпус 1 заполнен МЖ 6. В ферромагнитном корпусе 1 на

немагнитном диске 7, закреплённом на нижней крышке 3, расположена электромагнитная система 8, состоящая из ферромагнитных полюсов 9, выполненных в форме кольца, и размещённых между ферромагнитными полюсами 9 катушек управления 10. Ферромагнитный корпус 1 и электромагнитная система 8 образуют внешний рабочий зазор 11, заполненный МЖ 6. Электромагнитная система 8 и ферромагнитный стержень 4 образуют внутренний рабочий зазор 12, заполненный МЖ 6. В ферромагнитном корпусе 1 движется шток 13 с поршнем 14. Поршень состоит

из внешнего цилиндра 15, расположенного во внешнем рабочем зазоре 11 и внутреннего цилиндра 16, расположенного во внутреннем рабочем зазоре 12, закреплённых на немагнитном основании 17. Внешний и внутренний цилиндры выполнены набранными из чередующихся кольцевых ферромагнитных 18 и немагнитных 19 элементов. Для сохранения давления и предотвращения выплёскивания МЖ в зазоре между ферромагнитным корпусом 1 и штоком 13 располагается уплотнительное кольцо 20.

Техническим результатом от использования предлагаемого устройства является увеличение диапазона изменения силовой характеристики магнитожидкостного амортизатора вследствие увеличения коэффициента использования создаваемого магнитного потока и увеличения длины каналов, в которых на магнитную жидкость воздействует магнитное поле.

На данные конструкции принята к рассмотрению заявка на патент №2018100710 от 10.01.2018

4.9. Выводы

1. Исследование эффекта магнитной пружины показало, что смещением поршня от среднего положения можно получить несимметричную силовую характеристику, например, увеличить силу отбоя и уменьшить силу сжатия, что до этого достигалось применением клапанов и золотников. Отказ от подвижных частей увеличивает надёжность демпфера.

При симметричном расположении поршня с ферромагнитными элементами относительно полюсов корпуса реализуется установившееся устойчивое положение поршня в среднем положении.

2. Проведено сравнение экспериментальных данных с математической конечно-элементной моделью, разработанной в третьей главе. Для зависимостей силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня погрешность не превышает 5%.

3. Предложены конструкции ЭМЖД, расширяющие возможности регулирования силовой характеристики изменением вязкости МЖ путем управления магнитным потоком.

4. Разработана конструкция ЭМЖД, позволяющая использовать для изменения силовой характеристики не только изменяющуюся вязкость МЖ, но и эффект магнитной пружины, возникающий при смещении поршня относительно корпуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача повышения точности прогнозирования силовых характеристик и эффективности применения электромеханических магнитожидкостных демпферов (ЭМЖД) путём разработки и использования уточненных расчетных моделей с учётом взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов, совершенствования конструкции ЭМЖД.

В ходе достижения поставленной цели в диссертации получены следующие основные научные и практические результаты:

Установлена существенность взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в (ЭМЖД) при вязкостной диссипации энергии колебаний в тепловую энергию при воздействии магнитного поля. Показано, что для корректного анализа свойств демпферов необходим взаимосвязанный учет магнитных и теплового полей, поля скоростей течения магнитной жидкости (МЖ).

Разработанные уточнённые аналитические и численные математические модели ЭМЖД отличаются учетом влияния на силу сопротивления демпфера магнитной индукции и температуры, нелинейности магнитореологических характеристик, начального напряжения сдвига, профиля скорости течения МЖ в канале демпфера при воздействии внешнего магнитного поля.

Разработанные методики, алгоритмы и программы расчетов силовых характеристик ЭМЖД (два Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ), реализованные на основе использования разработанных моделей, позволяют повысить точность определения силовых характеристик (погрешность не более 7%).

Выполненные уточненные расчетные исследования магнитных, гидродинамических и тепловых процессов, свойств и характеристик ЭМЖД показали, что наиболее корректные результаты обеспечивает использование расчетов взаимосвязанных физических полей.

Предложенные, на основе результатов исследований, улучшения конструкции ЭМЖД позволяют формировать несимметричную силовую характеристику демпфера без использования механических клапанов и золотников.

Предложенные патентозащищенные конструкции поршневых управляемых магнитожидкостных амортизаторов позволяют эффективнее регулировать силовую характеристику изменением вязкости МЖ электромагнитным способом за счёт повышения эффективности использования магнитного потока.

Разработанный опытный автоматизированный стенд позволяет проводить экспериментальные исследования силовых характеристик ЭМЖД с изменяемой электромагнитным способом силой сопротивления. Экспериментально подтверждена достоверность теоретических исследований.

Результаты проведенных научных исследований рекомендуется внедрять при проектировании ЭМЖД для прогнозирования силы сопротивления демпфера и анализа протекающих в нём процессов.

Основные результаты диссертационной работы приняты к использованию в учебном процессе на кафедре «Электромеханика» по профилю «Электромеханика» в дисциплинах «Электромеханические магнитожидкостные устройства» и «Проектирование магнитожидкостных устройств», а также приняты к использованию в НПЦ «СплавТест».

В качестве направления дальнейшей работы можно рассматривать развитие конечно-элементной модели ЭМЖД для учёта гистерезиса в силовых характеристиках демпфера.

Список литературы

1. Aslam, M. Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control / M. Aslam, Y. Xiong-liang, D. Zhong-chao // Journal of Marine Science and Application — 2006. — Vol.5, No.3. — P. 17-29.
2. Benetti, M. Nonlinear Magnetic Analysis of Multi-plate Magnetorheological Brakes and Clutches / M. Benetti, E. Dragoni // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Milano. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/266095018_Nonlinear_Magnetic_Analysis_of_Multi-plate_Magnetorheological_Brakes_and_Clutches, свободный.
3. Bilvk, V. A. Simulation of Performance Characteristics of a Magnetorheological Shock-Absorber at the Dependence of Rheological Properties from the Magnetic Field / V. A. Bilvk, E. V. Korobko, V. A. Kuzmin // Vibroengineering. Vibroengineering Procedia. — 2013. — Vol. 1. — P. 19—22. ISSN 2345-0533.
4. Carlson, J. D. MR Fluids and Devices in the Real World / J. David Carlson // Int. J. of Modern Physics. — 2005. — Vol. 19. — P. 1463—1470.
5. Carlson, J.D. What Makes a Good MR Fluid? / J.D. Carlson // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2002. — Vol. 13, Iss. (7-8). — P. 431-435. Doi:10.1106/104538902028221
6. Carlson, J.D. Magneto- rheological fluid dampers for semi-active seismic control / J.D. Carlson, B.F.J. Spencer // Proceedings of the 3-rd International Conference on Motion and Vibration Control, 1996. — P. 35—40.
7. Carlson, J. D. Smart Prosthetics Based on Magnetorheological Fluids / J. D. Carlson, W. Matthis, J. R. Toscano // Proceedings of SPIE. — 2001. — Vol. 4332. — P. 308—316.
8. Carlson, J.D. Commercial Magneto- Rheological Fluid Devices / J.D. Carlson, D.M. Catanzarite, K.A. Clair, // International Journal of Modern Physics B. — 1996. — Vol. 10. — P. 2857–2865.
9. Case, D. Dynamic Magnetorheological Damper for Orthotic Tremor Suppression / D. Case, B. Taheri, and E. Richer, // HUIC Mathematics & Engineering, 2011. — Режим доступа: <http://huichawaii.org/assets/richer,-edmond-1.pdf>, свободный.
10. Chaudhuri, A. Rheological Parameter Estimation for a Ferrous Nanoparticle-based Magnetorheological Fluid using Genetic Algorithms / A. Chaudhuri, N. M. Wereley, R. Radhakrishnan, S. B. Choi // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2006. — Vol. 17. — P. 261—269. Doi: 10.1177/1045389X06063038
11. Chen, Z.H. Adaptive Semiactive Cable Vibration Control: A Frequency Domain

Perspective / Z.H. Chen, Y.Q. Ni // Shock and Vibration. — 2017. — Vol. 2017. — 12 pp. doi:10.1155/2017/2593503.

12. Chen, Z.Q. MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge / Z.Q. Chen, X.Y. Wang, J.M. Ko, Y. Ni. B.F. Spencer, O. Yang // Proceedings of the SPIE. — 2003. — Vol. 5057. — P. 229—235.

13. Forte, P. A Magnetorheological Fluid Damper for Rotor Applications / P. Forte, M. Paternò, E. Rustighi // International Journal of Rotating Machinery. — 2004. — Vol. 10(3). — P. 175—182. Doi:10.1080/10236210490426253.

14. Gavin, H. Optimal design of MR dampers / H. Gavin, J. Hoagg, M. Dobossy // Proceedings of U.S-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, Seattle, Washington, 14 August 2001. — P. 225—236.

15. Ghaffari, A. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / A. Ghaffari, S. Hassan Hashemabadi, M. Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2015. — 26(8). — P. 881—904. Doi:10.1177/1045389X14546650.

16. Ghita, G. Modelling of dynamic behavior of magnetorheological fluid damper by genetic algorithms based inverse method / G. Ghita, M. Giuclea, T. Sireteanu // The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Timisoara, Romania, October 21 – 22, 2004. – P. 619–628

17. Golinelli, N. Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control / N. Golinelli, A. Spaggiari // Frattura ed Integrità Strutturale. — 2015. — Vol. 32. — P. 13—23. Doi:10.3221/IGF-ESIS.32.02.

18. Goncalves, D.F. Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates: PhD thesis // Blacksburg, Virginia, 2005. – 114 pp.

19. Guan, X. Multi-objective Optimization of Magnetorheological Fluid Dampers / X. Guan, P. Guo, J. On // Pacific Science Review. — 2008. — Vol. 10. No. 3. — P. 351—357.

20. Gudmundsson, K.H. Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry: PhD thesis // Faculty of industrial engineering, University of Iceland, 2011. – 112 pp. ISBN 978-9979-9935-5-1.

21. Guerrero-Sanchez, C. Temperature effect on the magneto-rheological behavior of magnetite particles dispersed in an ionic liquid / C. Guerrero-Sanchez, A. Ortiz-Alvarado, U.S. Schubert // Journal of Physics: Conference Series. — 2009. — Vol. 149. Doi:10.1088/1742-6596/149/1/012052

22. Hiemenz, G.J. Semi-active magnetorheological helicopter crew seat suspension for vibration isolation / G.J. Hiemenz, W. Hu, N.M. Wereley // Journal of Aircraft. — 2008. — Vol. 45(3). — P. 945—953. Doi:10.2514/1.32736

23. Hyun, K. Effect of Magnetic Nanoparticle Additive on Characteristics of Magnetorheological Fluid / K. H. Song, B. J. Park, H. J. Choi // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS — 2009. — Vol. 45 no. 10. — P. 4045—4048. Doi:10.1109/TMAG.2009.2025390
24. Jiang, W. Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties / W. Jiang, Y. Zhang, S. Xuan, C. Guo, X. Gong // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2011. — Vol. 323. — P. 3246—3250. Doi: 10.1016/j.jmmm.2011.07.024
25. Jonsdottir, F. A Magneto-rheological Suspension for a Prosthetic Knee Joint / F. Jonsdottir, K. H. Gudmundsson, F. Thorsteinsson, O. Gutfleisch // Proceedings of the Nordic Rheology Society, Reykjavík, Iceland, 2009. — Vol. 17.
26. Kamble, V.G. Analysis of rheological properties of MR fluid based on variation in concentration of iron particles / V.G. Kamble, S. Kolekar // American Journal of Nanotechnology. — 2014. — Vol. 5(2). — P. 12—16. ISSN 1949-0216, doi:10.3844/ajntsp.2014.12.16.
27. Kazakov, Yu.B. Development of models of the magnetorheological fluid damper / Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, S.A. Nesterov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2017. — Vol. 431. — P. 269—272.
28. Kciuk, M. Properties and application of magnetorheological fluids / M. Kciuk, R. Turczyn // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2006. — Vol. 18. — P. 127—130.
29. Kciuk, S. Experimental and numerical studies of MR damper with prototype magnetorheological fluid / S. Kciuk, R. Turczyn, M. Kciuk // Computational Materials Science and Surface Engineering. — 2010. — 2(3). — P. 117—124.
30. Kciuk, S. Special Application Magnetorheological Valve Numerical and Experimental Analysis / S. Kciuk, P. Martynowicz // Solid State Phenomena. — 2011. — Vol. 177. — P. 102—115. Doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.177.102
31. Khedkar, Y.M. Modeling And Simulation of MR Damper Using COMSOL / Y.M. Khedkar, S.B. Joshi, P.M. Pawar, B.P. Ronge // Excerpt from the Proceedings of the 2014 COMSOL Conference in Bangalore. — Режим доступа: https://www.comsol.com/paper/download/213151/rymkhedkar_paper.pdf, свободный.
32. Kim, M.S. Carbonyl iron particles dispersed in a polymer solution and their rheological characteristics under applied magnetic field / M. S. Kim, Y. D. Liu, B. J. Park, C. You, H. J. Choi // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. — 2012. — Vol. 18. — P. 664—667. Doi:10.1016/j.jiec.2011.11.062.
33. Lau, Y.K. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension / Y.K. Lau, W.H. Liao // Proceedings of ImechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. — 2005. — Vol. 219(4). — P. 261—276.

34. Lopez-Lopez, M.T. Magnetorheology for suspensions of solid particles dispersed in ferrofluids / M.T Lopez-Lopez, P. Kuzhir, S. Lads, G. Bossis, F. Gonzalez-Caballero, J.D.G. Duran // *Journal Of Physics: Condensed Matter*. — 2006. — Vol. 18. — P. 2803—2813. Doi:10.1088/0953-8984/18/38/S18
35. Ouellette, J. Smart Fluids Move into the Marketplace / J. Ouellette // *The Industrial Physicist*. — 2005. — P. 14-17.
36. Peixinho, J. Laminar transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe / J.Peixinho, C.Nouar. C.Desaubry. B.Theron // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. — 2005. — Vol.128(2). — P. 172-184. Doi:10.1016/j.jnnfm.2005.03.008
37. Pradeep, P.P. Magnetorheological (MR) fluids: Principles and applications / P.P. Pradeep // *Smart Materials Bulletin*. — 2001. — Vol. 2001(2). — P. 7-10. Doi:10.1016/S1471-3918(01)80040-X
38. Preventing bridges from oscillating [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.empa.ch/web/s604/premiere-in-dubrovnik>
39. Rojek, J. Experimental and Numerical Studies of Magnetorheological Fluids / J. Rojek, G. Mikułowski, I. Marczevska // *Proceedings of the 6th edition of the World Conference of the International Association for Structural Control and Monitoring (IACSM), Barcelona, Spain, 15-17 July 2014*. — P.2152—2159.
40. Sapinski, B. Rheological properties of mr fluids recommended for use in shock absorbers / B. Sapiński, W. Horak // *Acta mechanica et 114automatic*. — 2013. — Vol. 7 no. 2. — P. 107—110. Doi: 0.2478/ama-2013-0019.
41. Seval, G. 2002), “Synthesis and Properties of Magnetorheological (MR) Fluids: PhD thesis // University of Pittsburgh, 2002. – 168 pp.
42. Simon, D.E. An Investigation of the Effectiveness of Skyhook Suspensions for Controlling Roll Dynamics of Sport Utility Vehicles Using Magneto-Rheological Dampers: PhD thesis // Blacksburg, Virginia, 2001. — 229 pp.
43. Singh, B. Wavelet Optimized Adaptive Mesh for MHD Flow Problems / B. Singh, A. Bhardwaj, R. Ali // *Applied Mathematics*. — 2012. — Vol. 3. — P. 127—134. Doi:10.4236/am.2012.32020
44. Tripathi, V. Experimental Analysis of Fabricated Magnetorheological Damper by Using Different Magnetorheological Fluid. A Review / V. Tripathi, U.K.Joshi // *IJESRT*. — April, 2014. — 3(4). — P. 8025—8032.
45. Vekas, L. Ferrofluids and Magnetorheological Fluids / L. Vekas // *Aances in Science and Technology* — 2008. — Vol.54 — P. 127-136. Doi:10.4028/www.scientific.net/AST.54.127.

46. Wang, Q. A Novel Double-Piston Magnetorheological Damper for Space Truss Structures Vibration Suppression / Q. Wang, M. Ahmadian, Z. Chen // Shock and Vibration. — 2014. — 2014. — Article ID 864765. — 11 pp. doi:10.1155/2014/864765
47. Wilsony, N.L. Performance Robustness of a Magnetorheological Seat Suspension to Temperature Variations using Skyhook Control / N.L. Wilsony, N.M. Wereley, Y.T. Choi, G.J. Hiemenz, W. Huy // Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009 Mehdi Ahmadian; Mehrdad N. Ghasemi-Nejhad San Diego, California, USA, March 08, 2009. Doi:10.1117/12.817739
48. www.lord.com [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.lord.com>
49. Yang, G. Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control: PhD thesis // Notre Dame, Indiana, 2001. — 480 pp.
50. Zhu, X. Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis / X. Zhu, X. Jing, L. Cheng // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2012. — 23(8). — P. 839—874. Doi:10.1177/1045389X12436735
51. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. — 4-е изд. Перераб. и доп. — М.: Наука Гл. ред. Физ.-мат. Лит. 1988. — 640 с.: ил.
52. Блум, Э.Я. Магнитные жидкости / Э.Я. Блум, А.О. Цеберс — М.: Знание, 1989. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика; № 4). ISBN 5-07-000138-6 [43]
53. Гаврилов, А.А. Вычислительные алгоритмы и комплекс программ для численного моделирования течений неньютоновских жидкостей в кольцевом канале: дис ... канд. Физ.-мат. Наук: 05.13.18 / Гаврилов Андрей Анатольевич. — Новосибирск, 2014. — 144 с.
54. Генин, Л.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах / Л.Г. Генин, В.Г. Свиридов. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 200 с.
55. Гордеев, Б. А. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б. А. Гордеев, В. И. Ерофеев, А. В. Синев, О.О. Мугин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 176 с. ISBN 5-9221-0561-2.
56. Дербаремдикер, А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. — Машиностроение. 1969.
57. Добромиров, В.Н. Конструкции амортизаторов: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В.Н. Добромиров, А.В. Острецов. — М: МГТУ «МАМИ», 2007. — 47 с.
58. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский — Л.: Энергоатомиздат., Ленингр. Отд-ние, 1983. — 256 с.

59. Казаков, Ю.Б. Исследование взаимосвязанных процессов в магнитожидкостном демпфирующем устройстве / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2014. – Вып. 6. – С.44-48.

60. Казаков, Ю.Б. Магнитореологический демпфер с поршневой магнитной системой / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2012. – Вып. 6. – С.23-28.

61. Казаков, Ю.Б. Расчётный анализ силовой характеристики электромеханического магнитожидкостного демпфера / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2015. – Вып. 4. – С.17-22.

62. Казаков, Ю.Б. Особенности разработки и расчета магнитожидкостных демпфирующих устройств / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию со Дня образования учебного заведения и Году пожарной охраны России, Иваново, 14 апреля 2016 г. / под общ. Ред. В. В. Киселева. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарноспасательная академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 52-56

63. Казаков, Ю.Б. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов; под общ. Ред. Ю.Б. Казакова. — Иваново: ГОУВПО ИГЭУ, 2010. — 184 с. ISBN 978-5-89482-709-4

64. Казаков, Ю.Б. Исследование напорного течения магнитной жидкости / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // IV Всероссийская науч. Конф. «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» 15–19 сентября 2013 г. Сб. науч. Тр. ГОУ ВПО «Ставропольский гос. Ун-т», Ставрополь, 2013. – С. 129 – 135.

65. Казаков, Ю.Б. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах: учебное пособие / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелыкалов. — Иван. Гос. Энерг. Ун-т. — Иваново, 2001. — 100 с. ISBN 5-89482-108-8.

66. Казаков, Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Взаимосвязанные физические процессы в электромеханическом магнитожидкостном демпфере / 17-я международная плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Иваново, 6 – 9 сентября 2016 года) – Иваново ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2016. – С. 66 – 73.

67. Казаков, Ю.Б. Типовые конструкции демпферов на основе нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // 15-я международная плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Иваново, 4 – 7

сентября 2012 года) – Иваново ФГБОУ ВПО «Ивановский гос. Энергетич. Университет им. В.И. Ленина», 2012. – С. 307 – 314.

68. Калинин, П.С. Анализ параметрических моделей магнитореологических демпфирующих устройств для колесной транспортной техники / П.С. Калинин, В.А. Горелов, М.М. Жилейкин // Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 25–31.

69. Кубич, В.И. К вопросу построения рабочей характеристики амортизатора с магнитореологической жидкостью / В.И. Кубич, Ю.В. Ядчишин // Вестник КДПУ имени Михаила Остроградского. – 2009. – Вып. 4., часть 2. – С. 87–90.

70. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. — Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ, 2011. — 264 с. ISBN 978-5-89482-772-8

71. Морозов, Н.А. Течение магнитной жидкости в щелевом канале с поперечным магнитным полем / Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // 16-я международная плеская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. (Плёт, 9 – 12 сентября 2014 года) / ИГЭУ им. В.И. Ленина. – Иваново, 2014. – С.173-179.

72. Найгерт, К.В. Моделирование и расчет рабочих процессов магнитореологического дросселя: дис ... канд. Тех. Наук: 05.04.13 / Найгерт Катарина Валерьевна. – Челябинск, 2016. – 147 с.

73. Нестеров, С.А. Разработка моделей электромеханического магнитореологического демпфирующего устройства с учетом взаимного влияния физических полей / С.А. Нестеров // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2017. – Вып. 3. – С.48-53. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.048-053

74. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин [и др.]; под ред. Проф. Д.В. Орлова, проф. В.В. Подгоркова. — М.: Машиностроение, 1993. — 275 с.

75. Пат. 2506476 Российская Федерация, МПК F16F 9/53 F16F 6/00. Поршневой магнитожидкостный амортизатор /Морозов Н.А., Нестеров С.А.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ (RU). – № 2012121982/11; заявл. 28.05.2012; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. – 7 с.

76. Пат. 2550793 Российская Федерация, МПК F16F 9/53 F16F 6/00. Управляемый магнитожидкостный амортизатор /Морозов Н.А., Нестеров С.А., Казаков Ю.Б.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ (RU). – № 2013153796/11; заявл. 04.12 2013; опубл. 10.05.15, Бюл. № 13. – 5 с.

77. Перминов, С.М. Исследование влияния температуры на параметры и работу магнитожидкостных герметизаторов / С.М. Перминов, Т.И. Вильгельм // Тезисы 7

междунар. Плесской конференции по магнитным жидкостям / Иван. Гос. Энерг. Ун-т. – Иваново: ИГЭУ, 1996. — С. 160.

78. Полунин, В.М. Механика нано- и микродисперсных магнитных сред / В.М. Полунин, А.М. Стороженко, П.А. Ряполов, Г.В. Карпова; под ред. В.М. Полунина. — М.: — ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 192 с. ISBN 978-5-9221-1640-4

79. Полунин, В.М. Начала механики дисперсных магнитных сред: учеб. Пособие / В.М. Полунин, А.М. Стороженко, П.А. Ряполов [и др.]; под ред. Проф. В.М. Полунина. — Курск: ФГБОУВПО «Юго-Западный государственный университет», 2014. — 135 с. ISBN 978-5-9905939-5-4.

80. Рандин, Д.Г. Электротехническая активная система виброзащиты с магнитореологическим демпфером: дис ... канд. Тех. Наук: 05.09.03 / Рандин Дмитрий Геннадьевич. – Самара, 2016. – 133 с.

81. Розенцвейг, Р. Феррогидродинамика: Пер. с англ. / Р. Розенцвейг — М.: Мир, 1989. — 356 с. ISBN 5-03-000997-3.

82. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615094 / С.А. Нестеров. Программа для расчета силовой характеристики прямоходового магнитожидкостного демпфера; заявитель и патентообладатель ИГЭУ (RU) – № 2016612419, 21.03.2016; зарегистр. 16.05.2016.

83. Страдомский, Ю.И. Основы феррогидродинамики: учебное пособие / Ю. И. Страдомский. — М-во образования Рос. Федерации, Иван. Гос. Энерг. Ун-т. — Иваново: Б.и., 2004. — 108 с.

84. Тарг, С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. — М.: Гостехиздат, 1951. — 420 с.

85. Управляемые демпфирующие устройства с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. С.А. Нестеров, И.М. Арефьев. — Иваново: ФГБОУВО ИГЭУ, 2016. – 148 с. ISBN 978-5-00062-203-2

86. Шульман, З.П. Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский — Минск: Наука и техника, 1982. — 184 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Материалы экспериментальных исследований

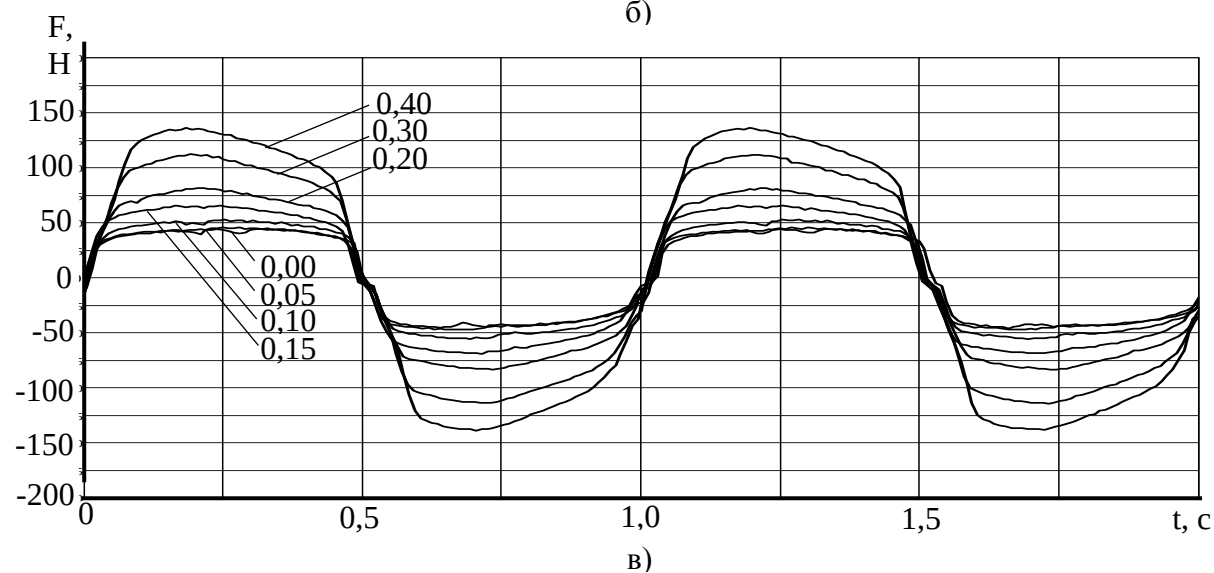
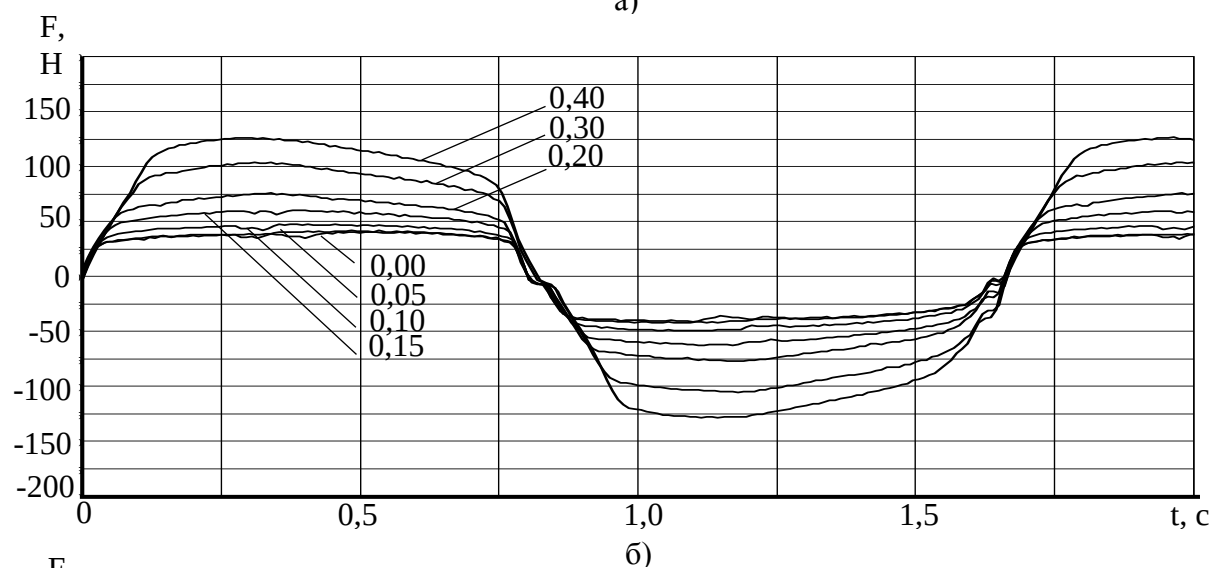
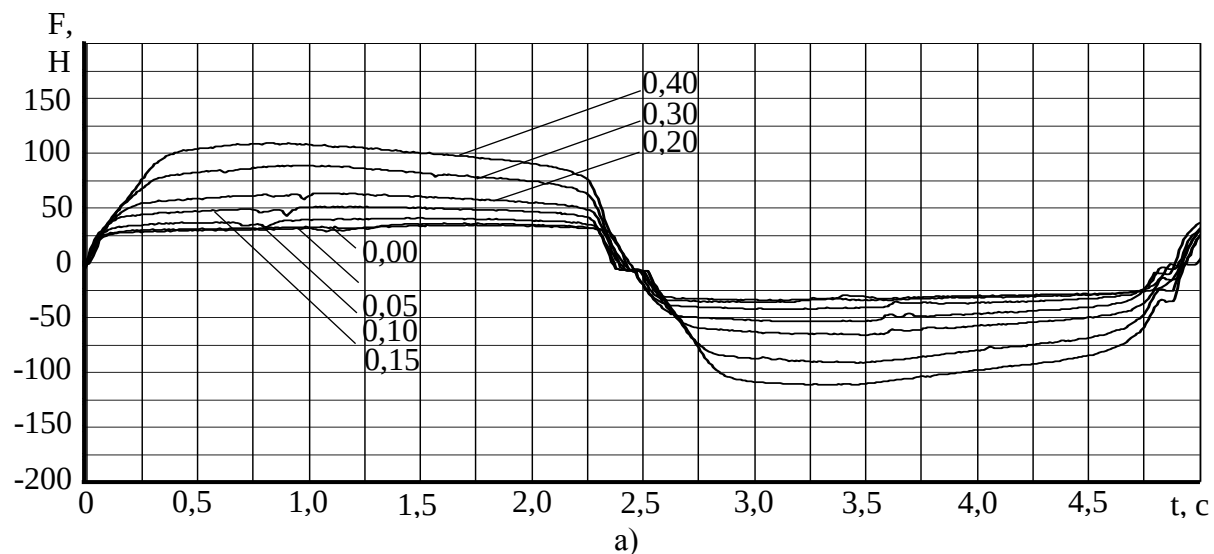


Рисунок П1.1. Зависимости силы сопротивления демпфера с немагнитным поршнем от времени (положение 1): а – частота колебаний 0,2 Гц; б – частота колебаний 0,6 Гц; в – частота колебаний 1,0 Гц

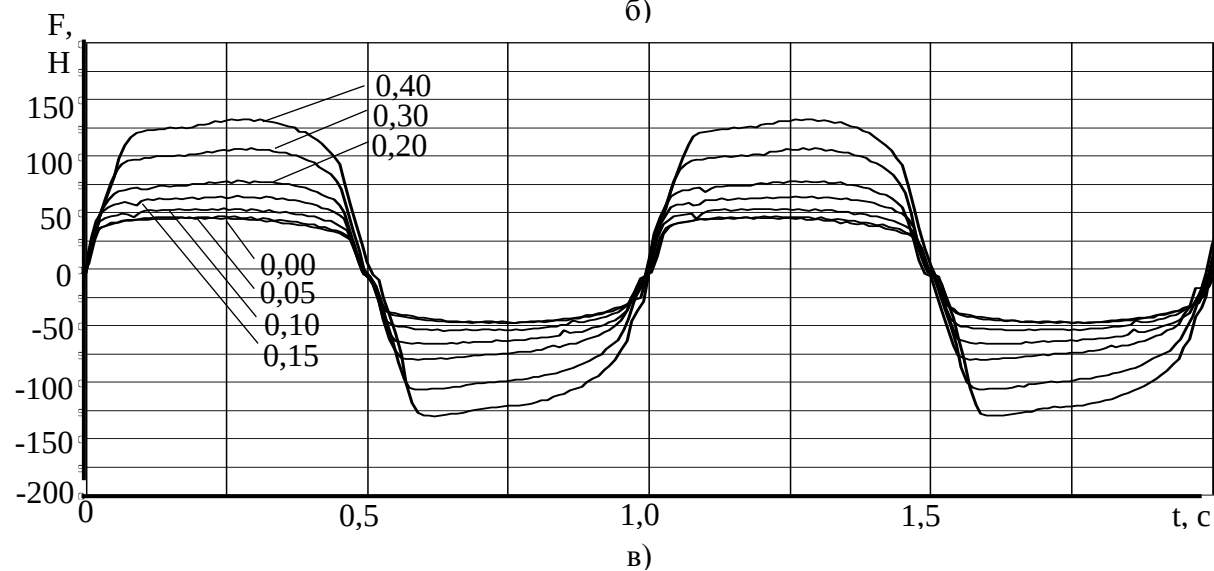
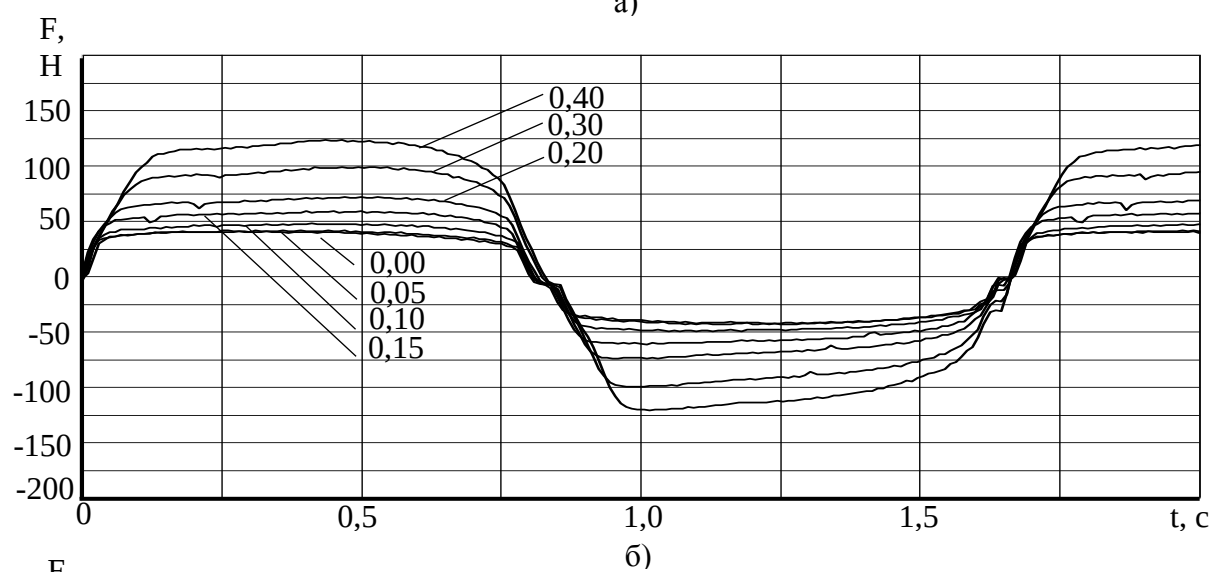
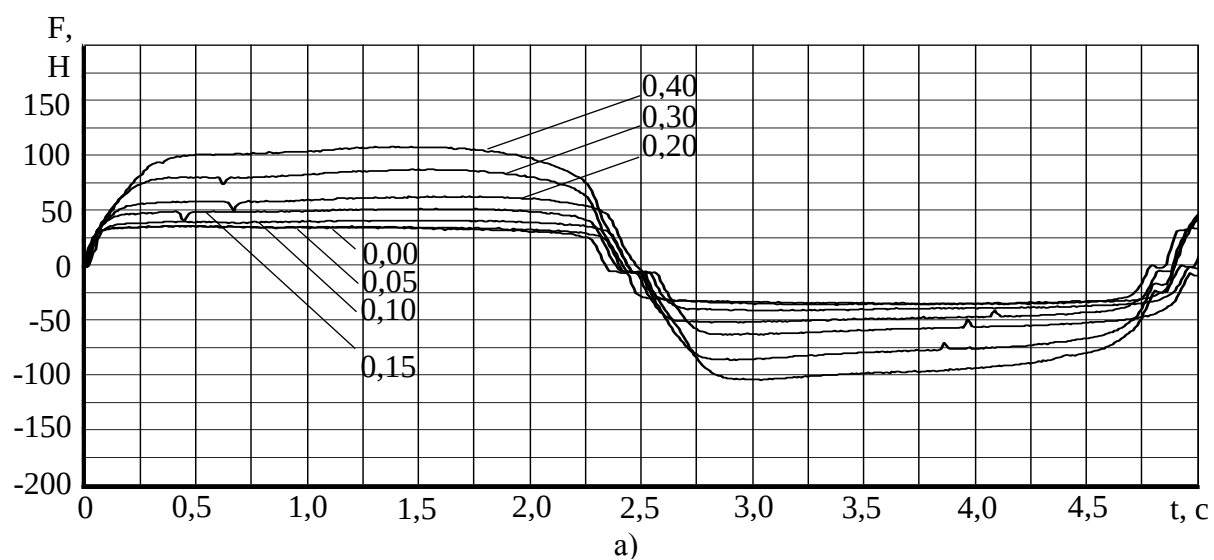


Рисунок П1.2. Зависимости силы сопротивления демпфера с немагнитным поршнем от времени (положение 2): а – частота колебаний 0,2 Гц; б – частота колебаний 0,6 Гц; в – частота колебаний 1,0 Гц

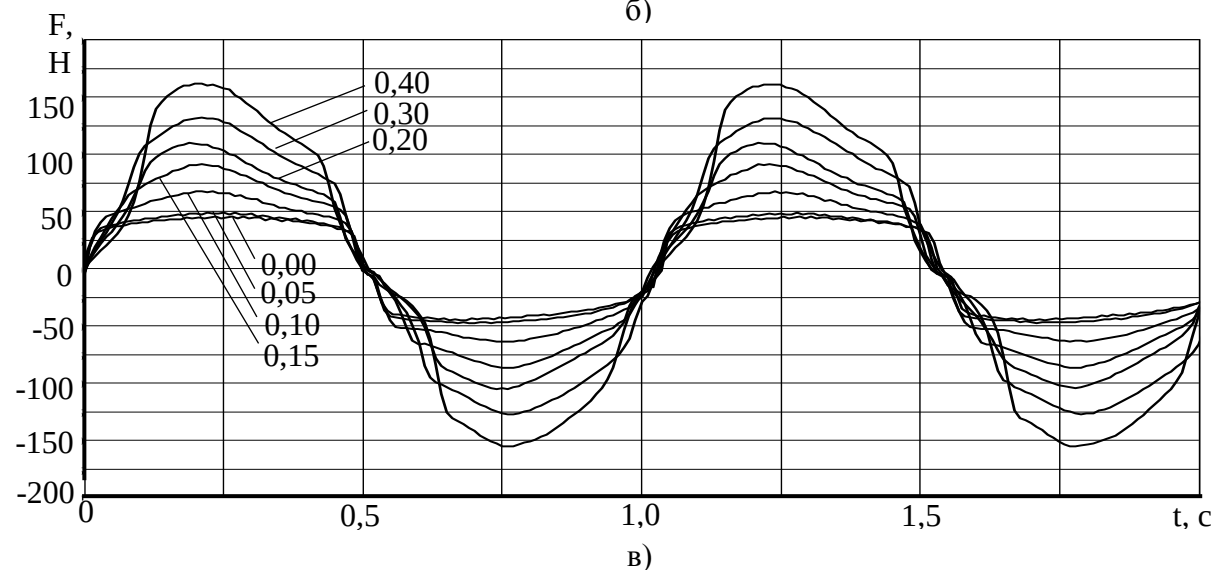
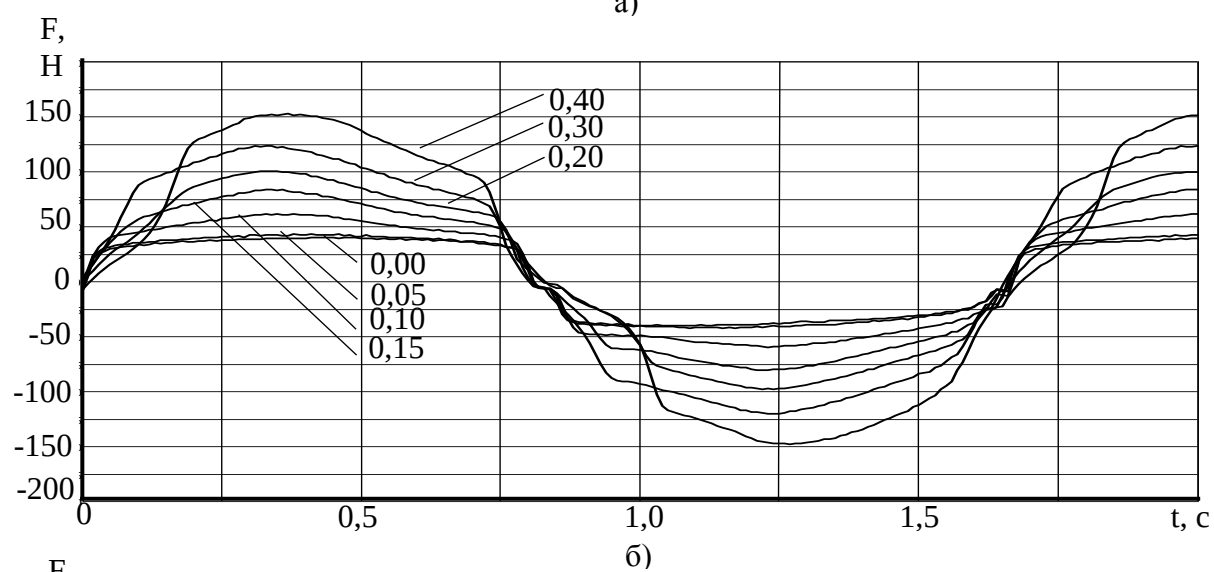
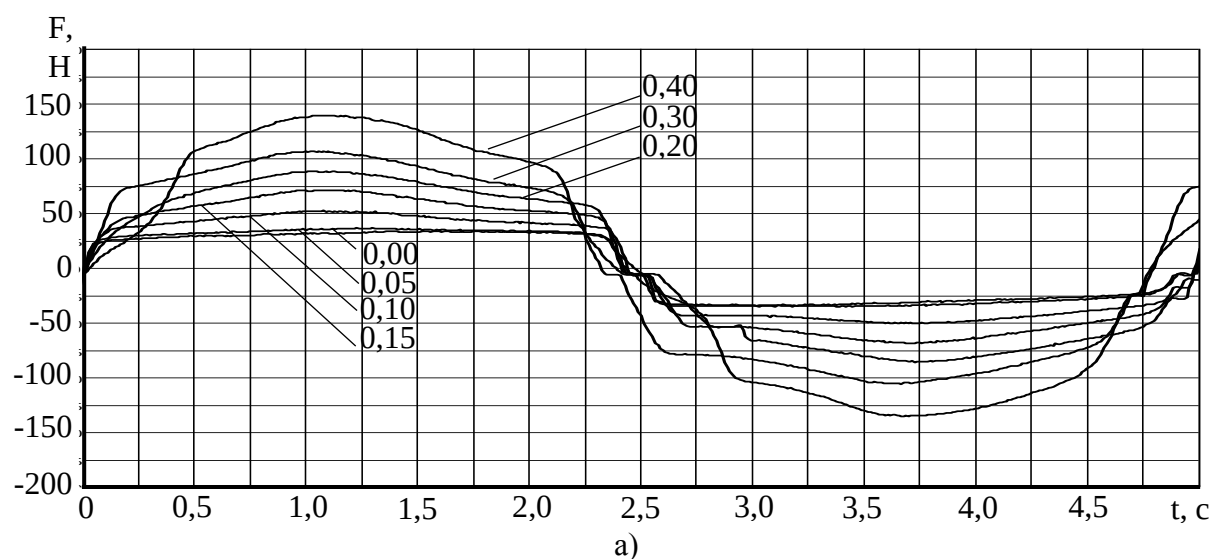


Рисунок П1.3. Зависимости силы сопротивления демпфера с ферромагнитными элементами на поршне от времени (положение 1). а – частота колебаний 0,2 Гц; б – частота колебаний 0,6 Гц; в – частота колебаний 1,0 Гц

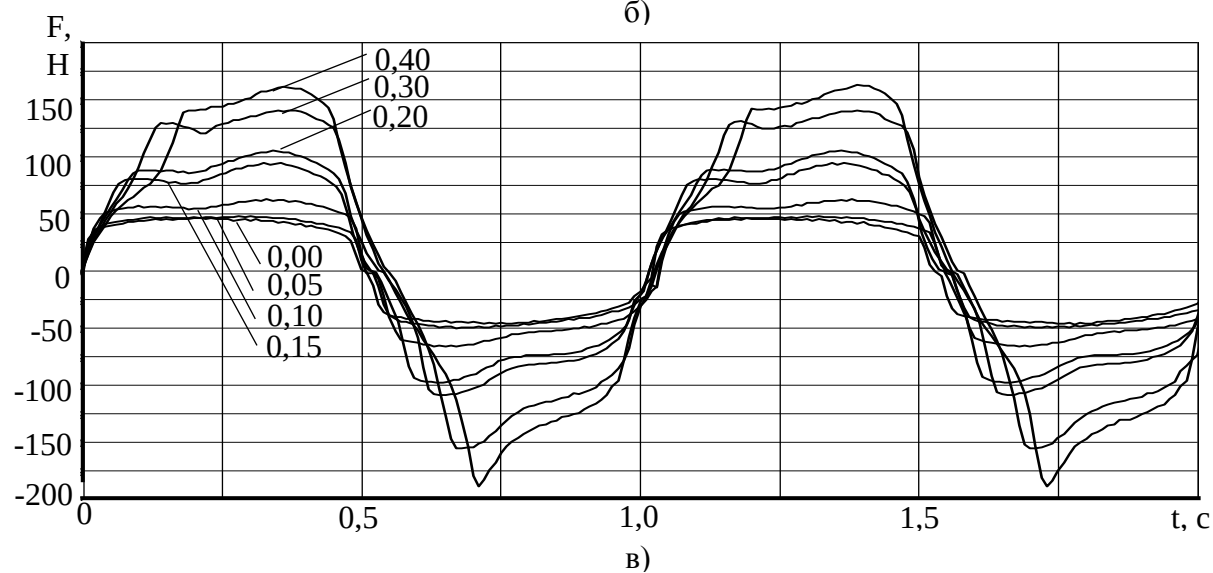
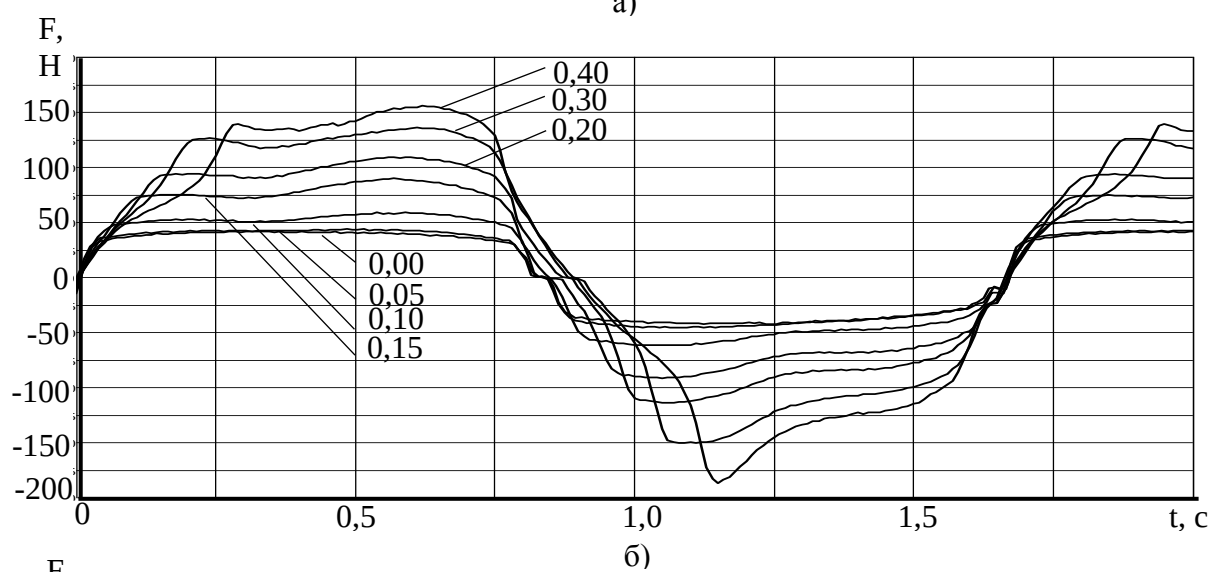
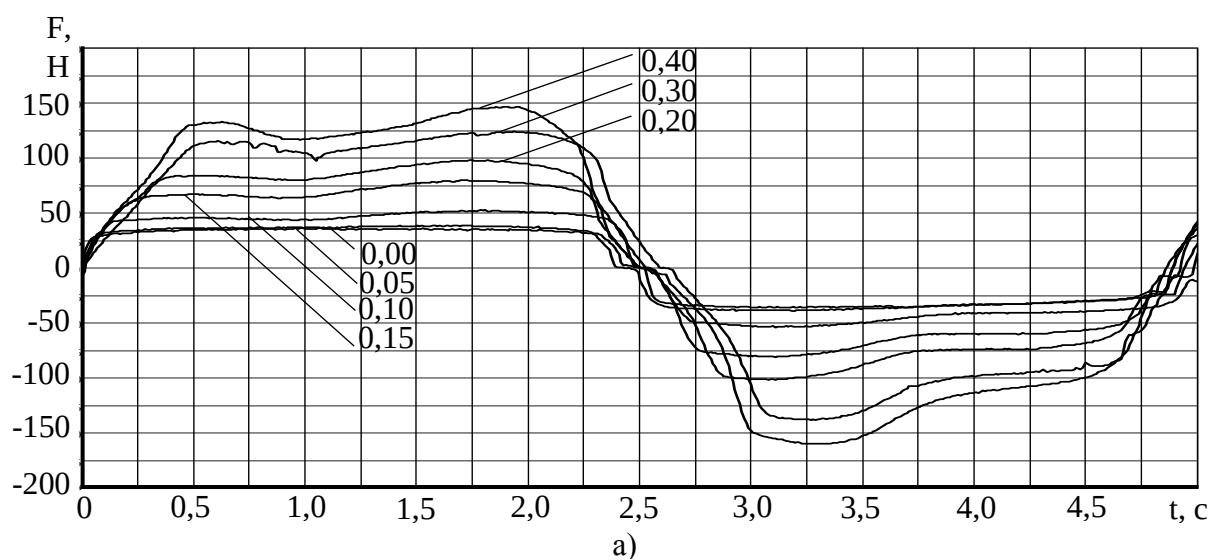
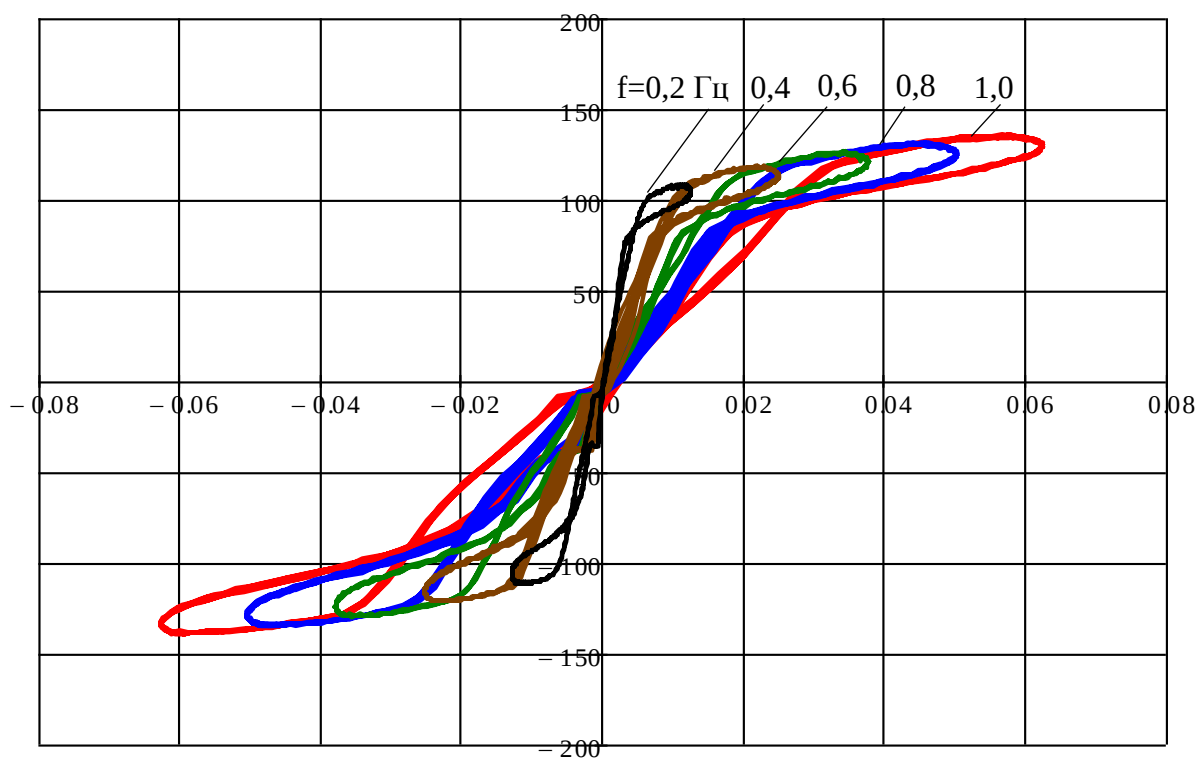
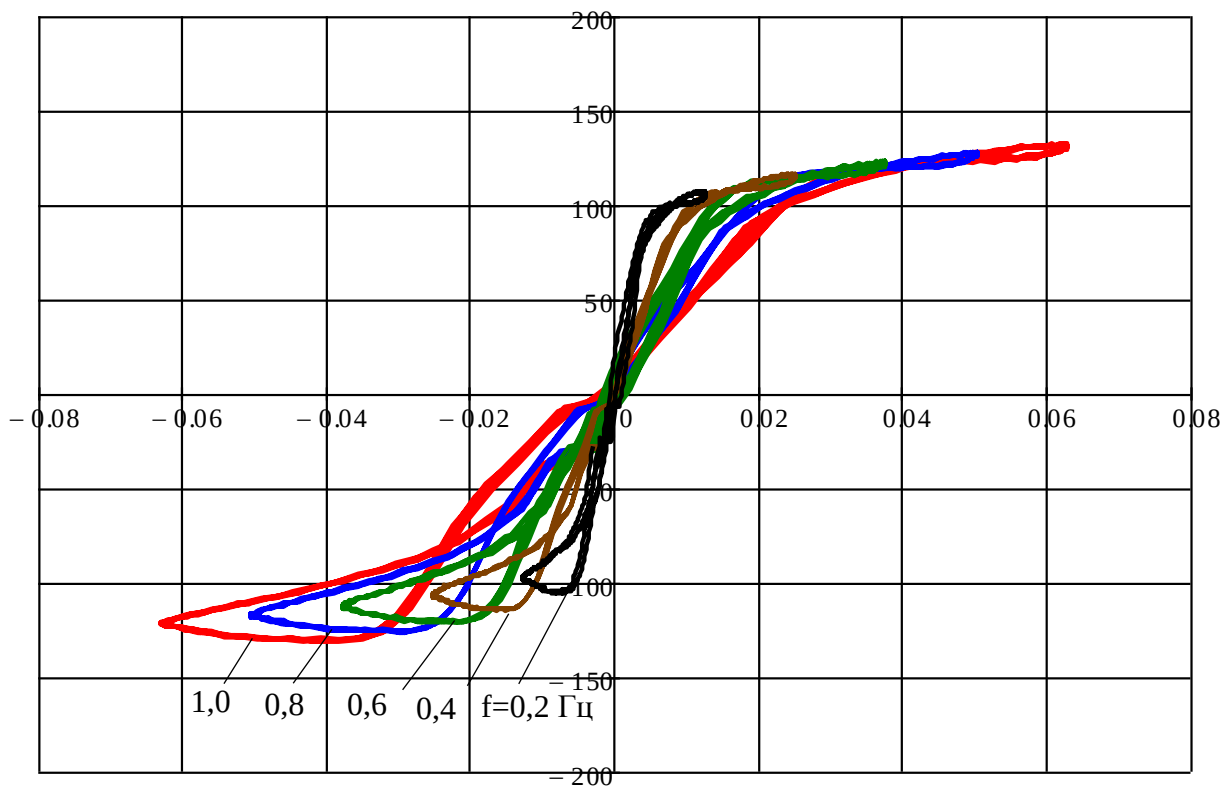


Рисунок П1.4. Зависимости силы сопротивления демпфера с ферромагнитными элементами на поршне от времени (положение 2). а – частота колебаний 0,2 Гц; б – частота колебаний 0,6 Гц; в – частота колебаний 1,0 Гц

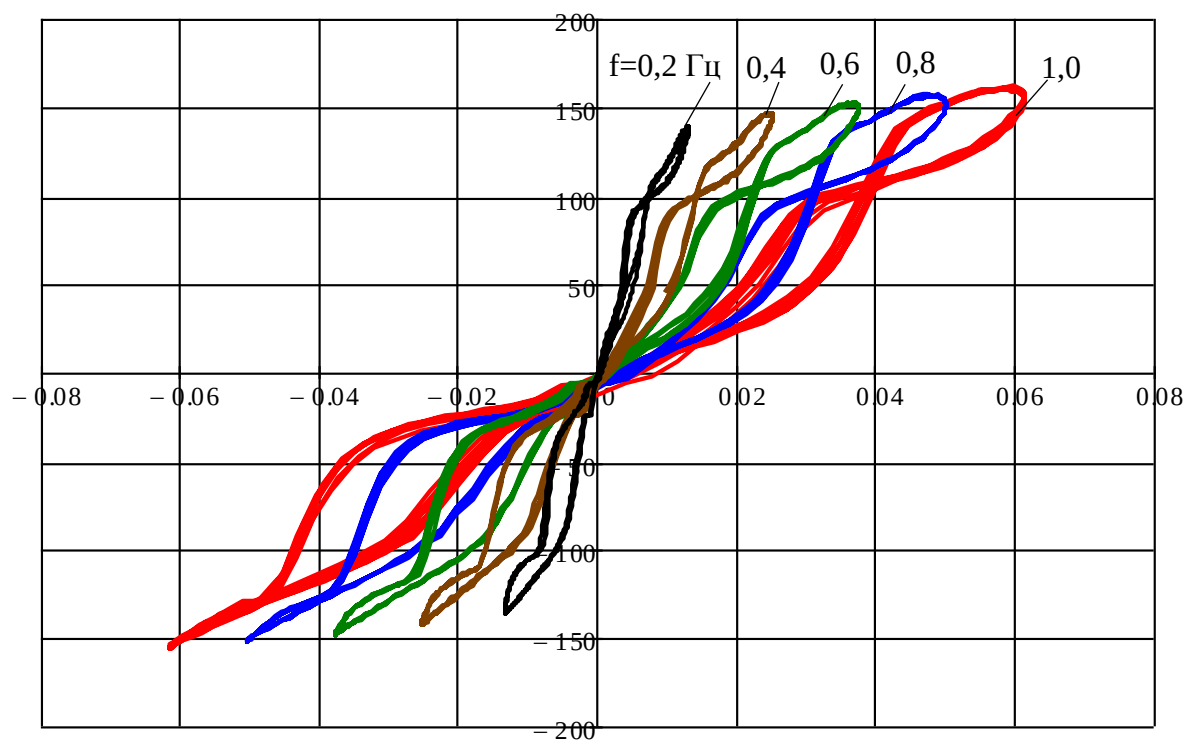


а)

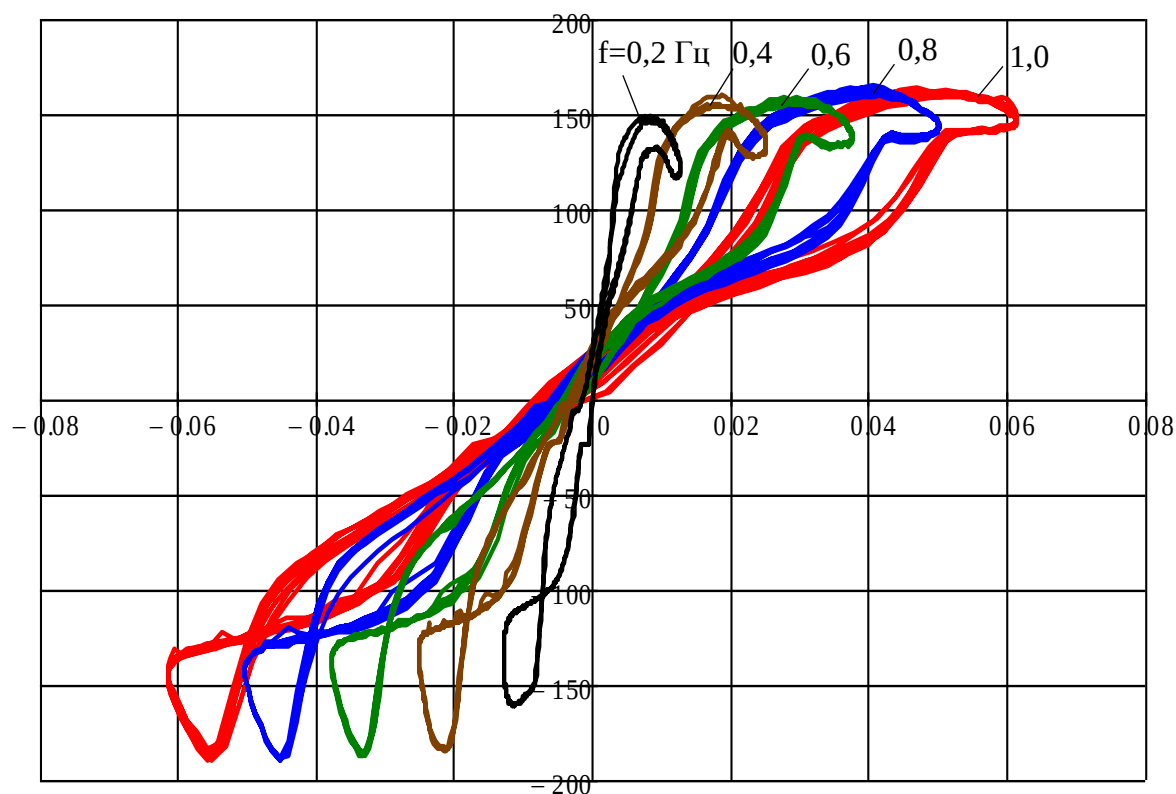


б)

Рисунок П1.5. Зависимости силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня при индукции 0,4 Тл для разных частот колебаний (немагнитный поршень): а – положение 1; б – положение 2

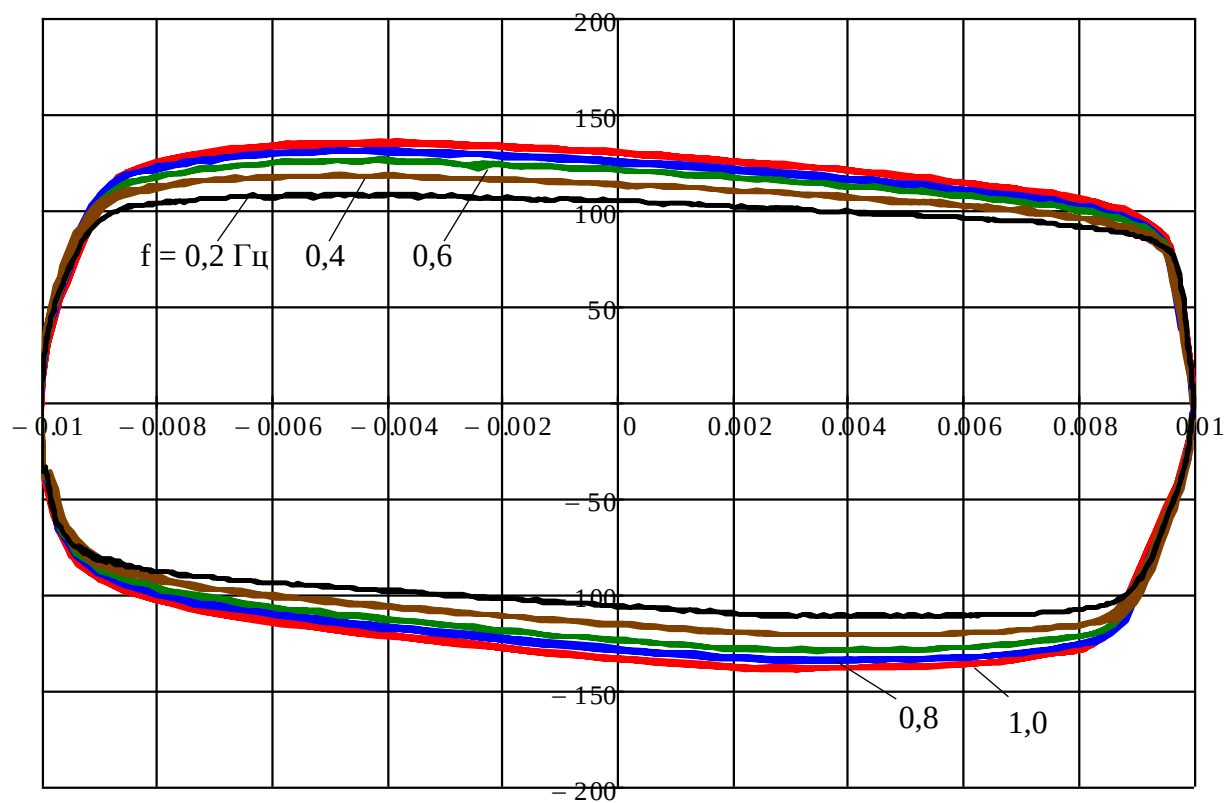


а)

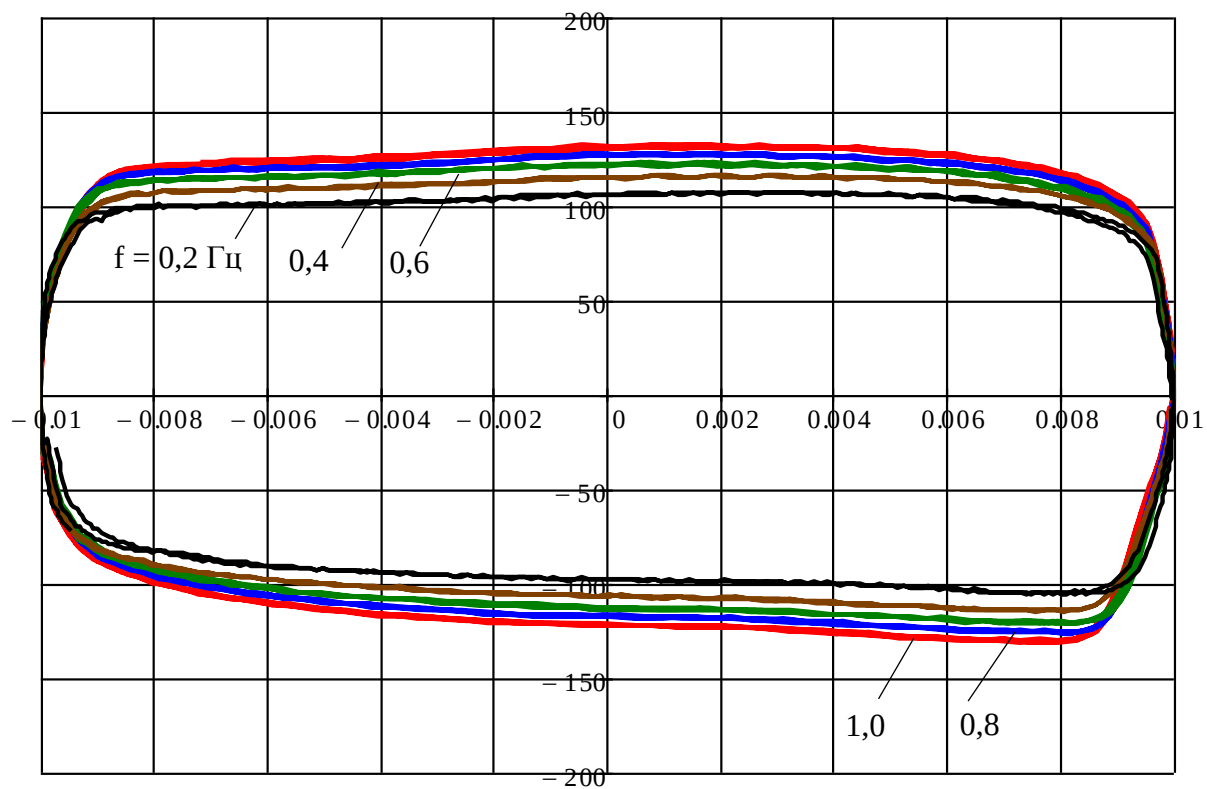


б)

Рисунок П1.6. Зависимости силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня при индукции 0,4 Тл для разных частот колебаний (поршень с ферромагнитными элементами): а – положение 1; б – положение 2

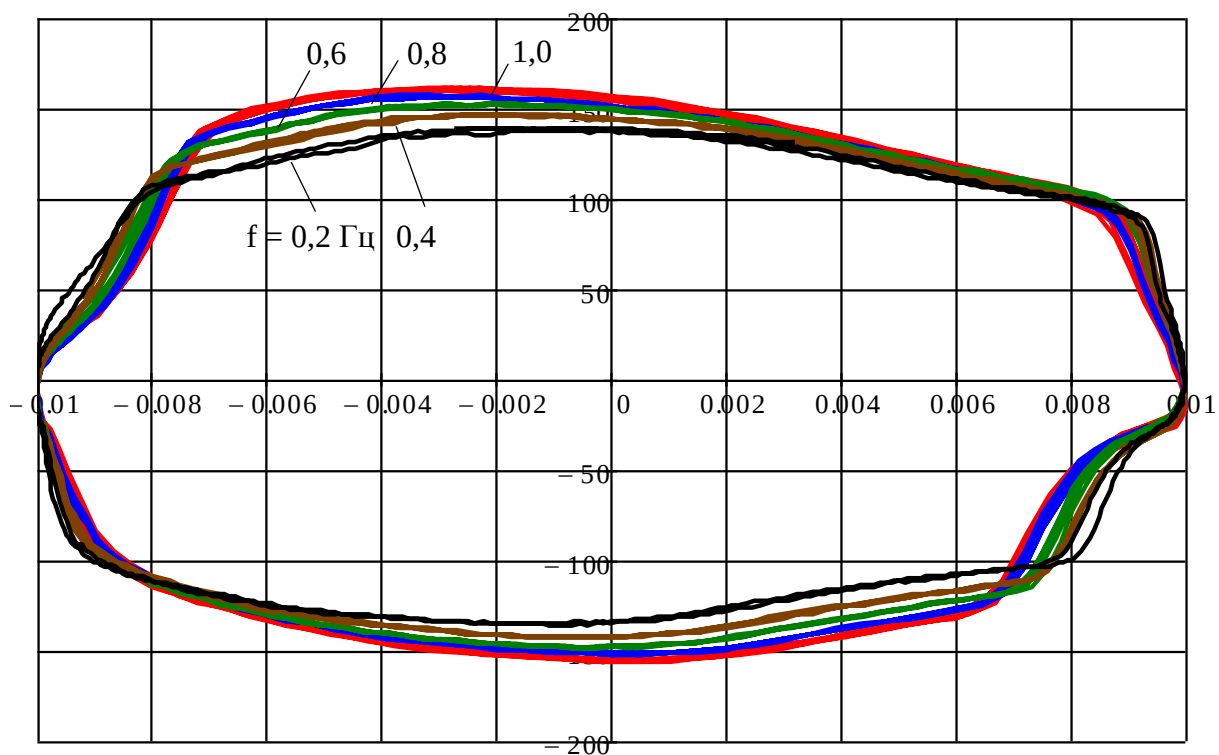


а)

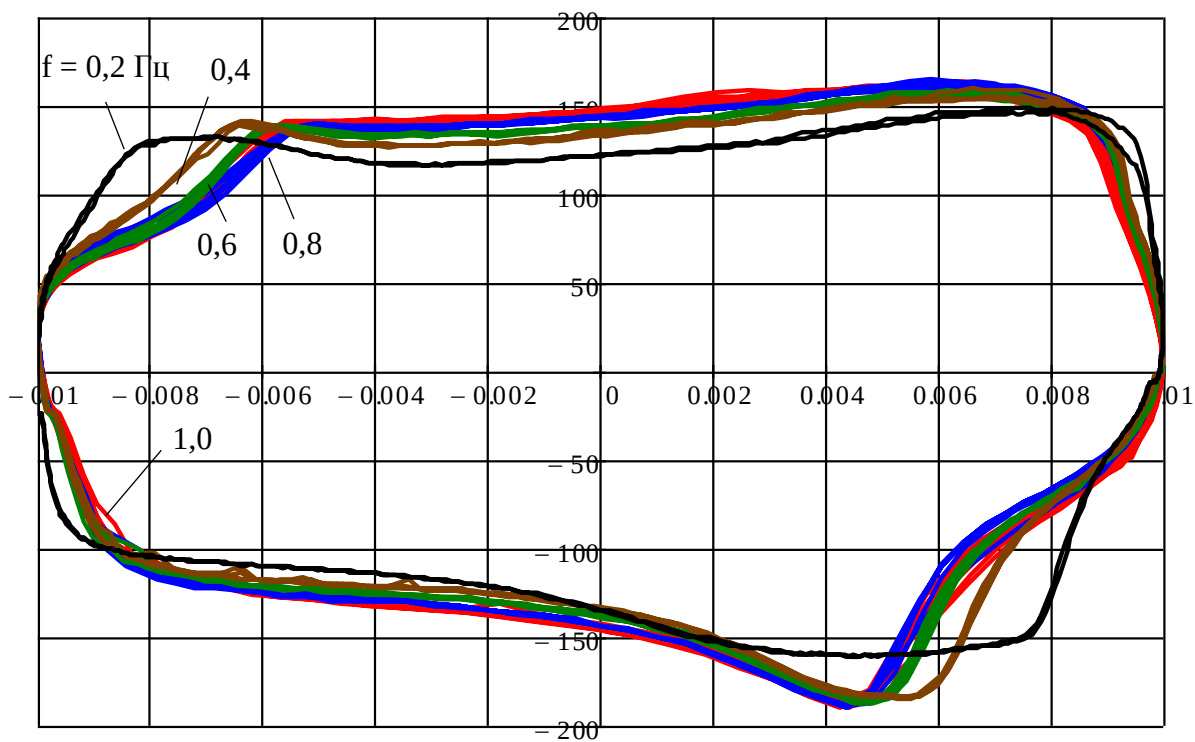


б)

Рисунок П1.7. Зависимости силы сопротивления демпфера от положения поршня при индукции 0,4 Тл для разных частот колебаний (немагнитный поршень):
а – положение 1; б – положение 2

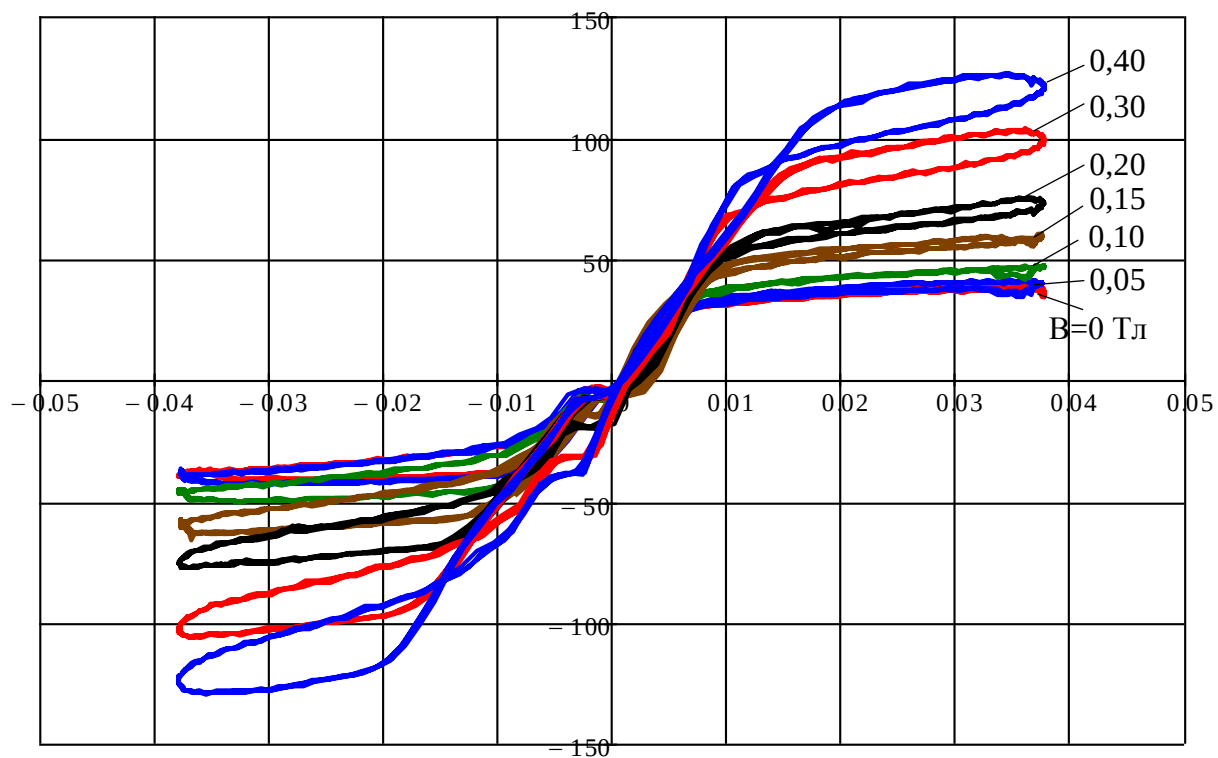


а)

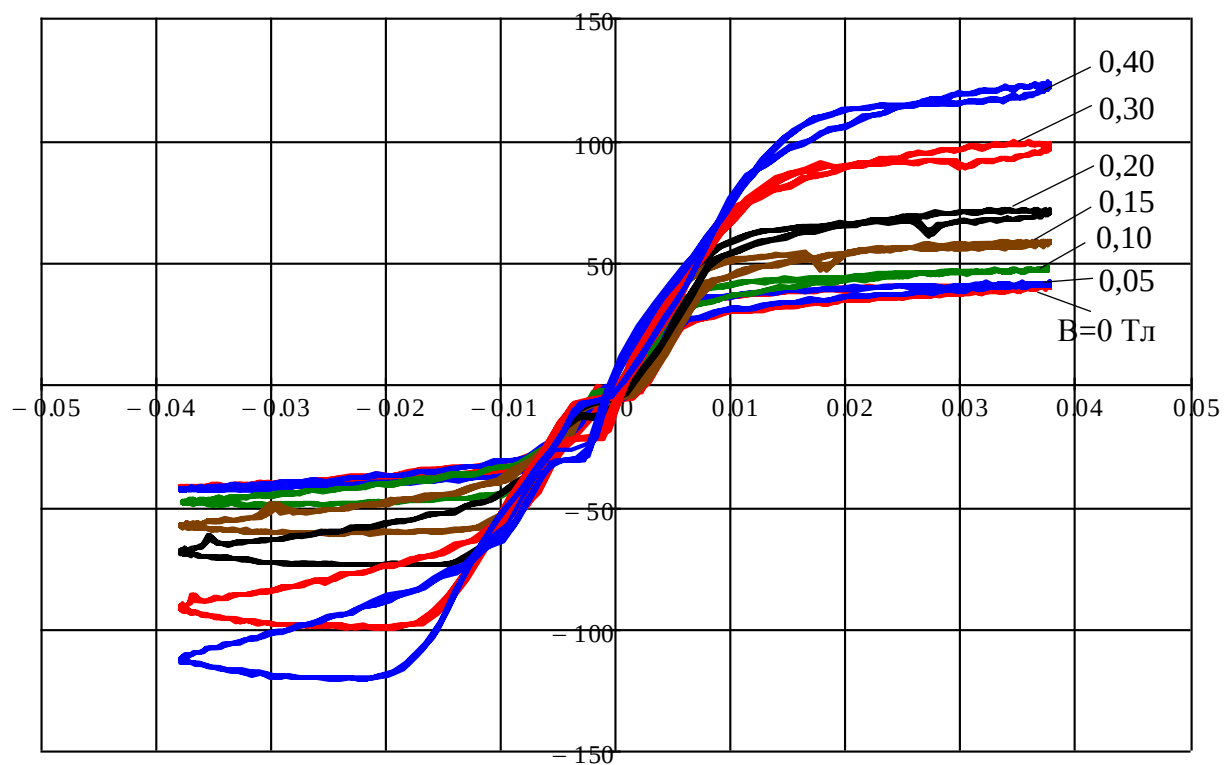


б)

Рисунок П1.8. Зависимости силы сопротивления демпфера от положения поршня при индукции 0,4 Тл для разных частот колебаний (поршень с ферромагнитными элементами): а – положение 1; б – положение 2

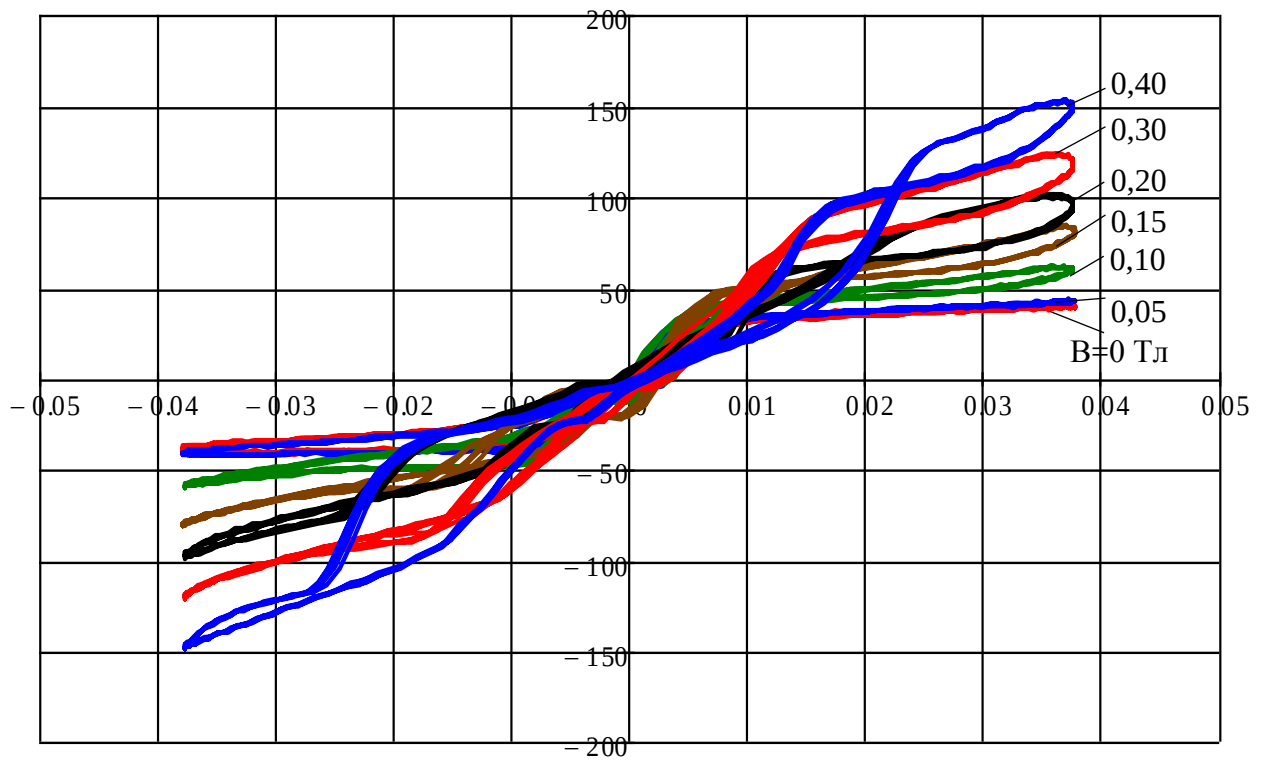


а)

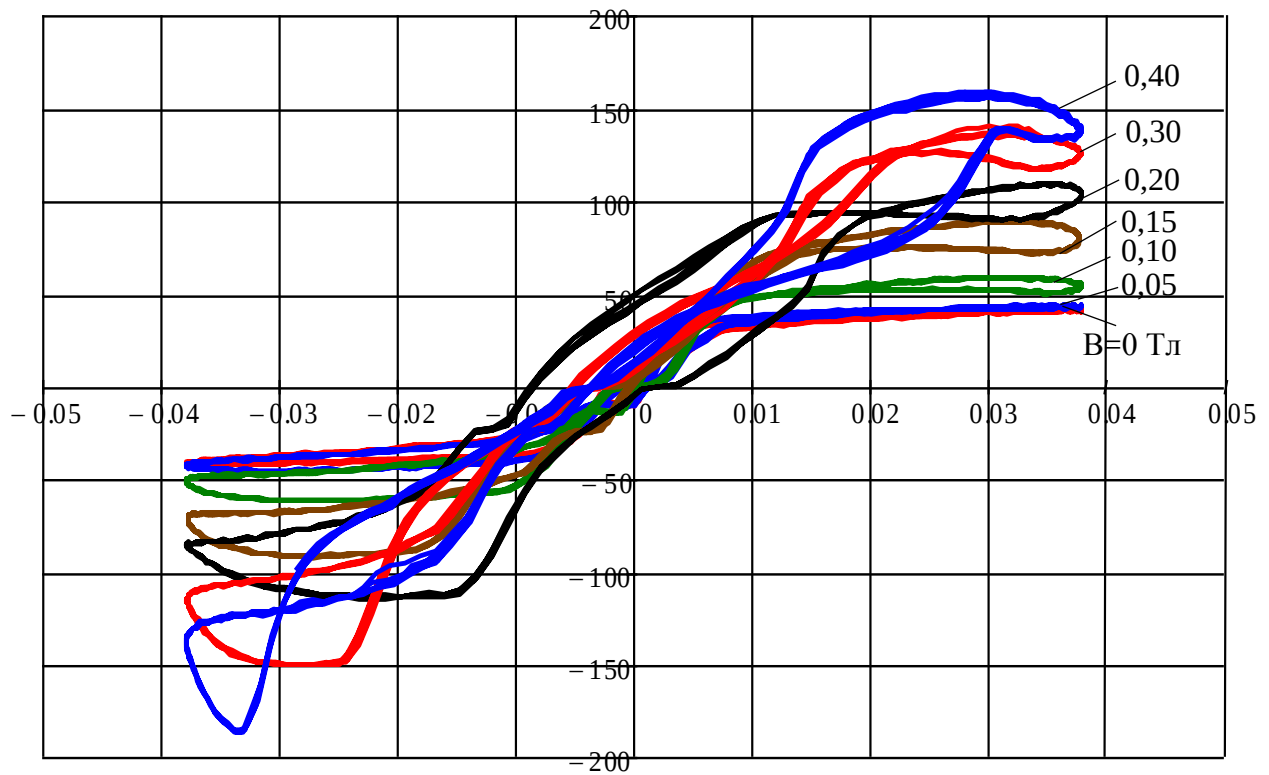


б)

Рисунок П1.9. Зависимости силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня при частоте 0,6 Гц для разных индукций (немагнитный поршень):
а – положение 1; б – положение 2

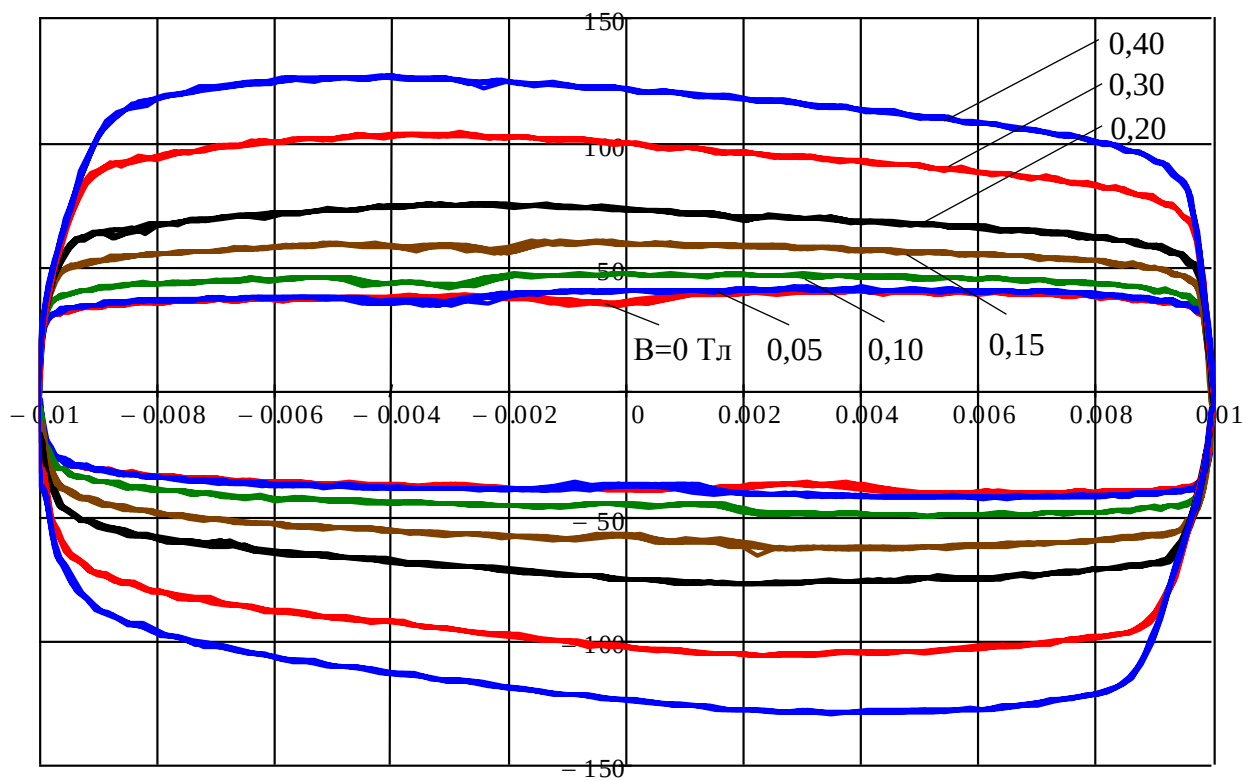


а)

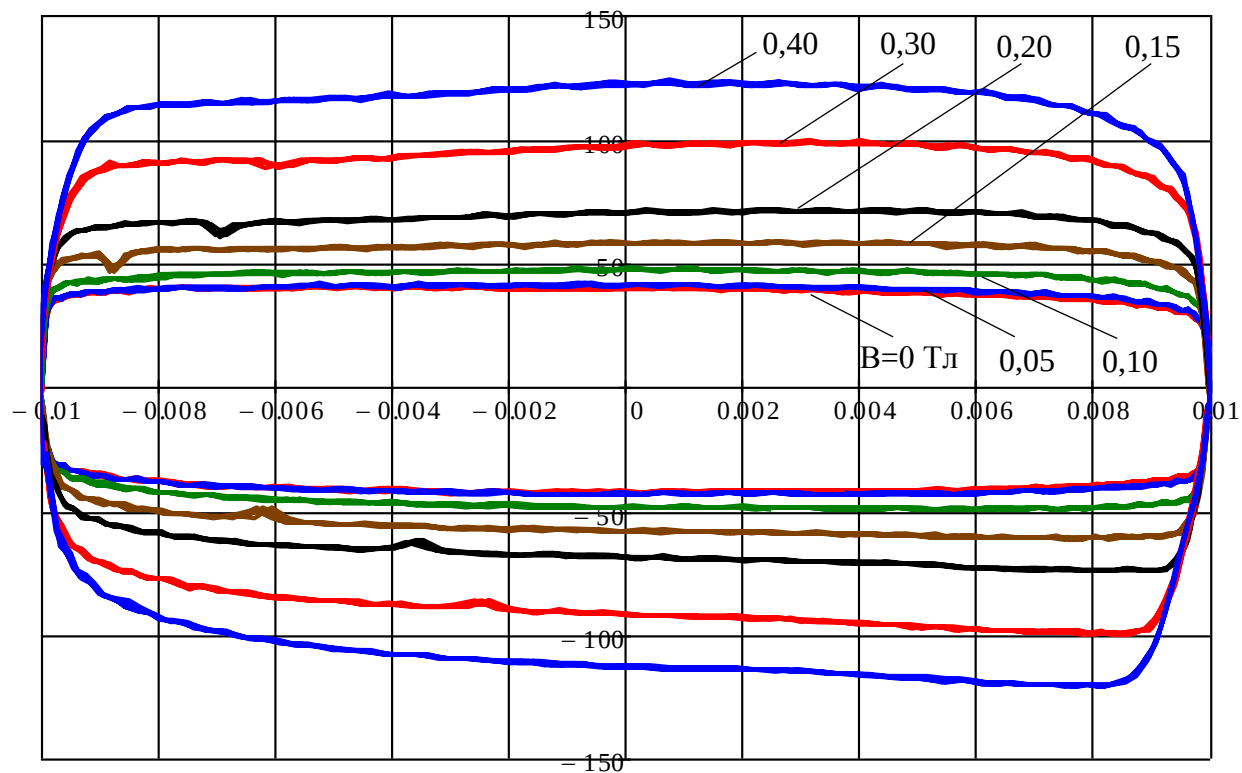


б)

Рисунок П1.10. Зависимости силы сопротивления демпфера от скорости движения поршня при частоте 0,6 Гц для разных индукций (поршень с ферромагнитными элементами): а – положение 1; б – положение 2

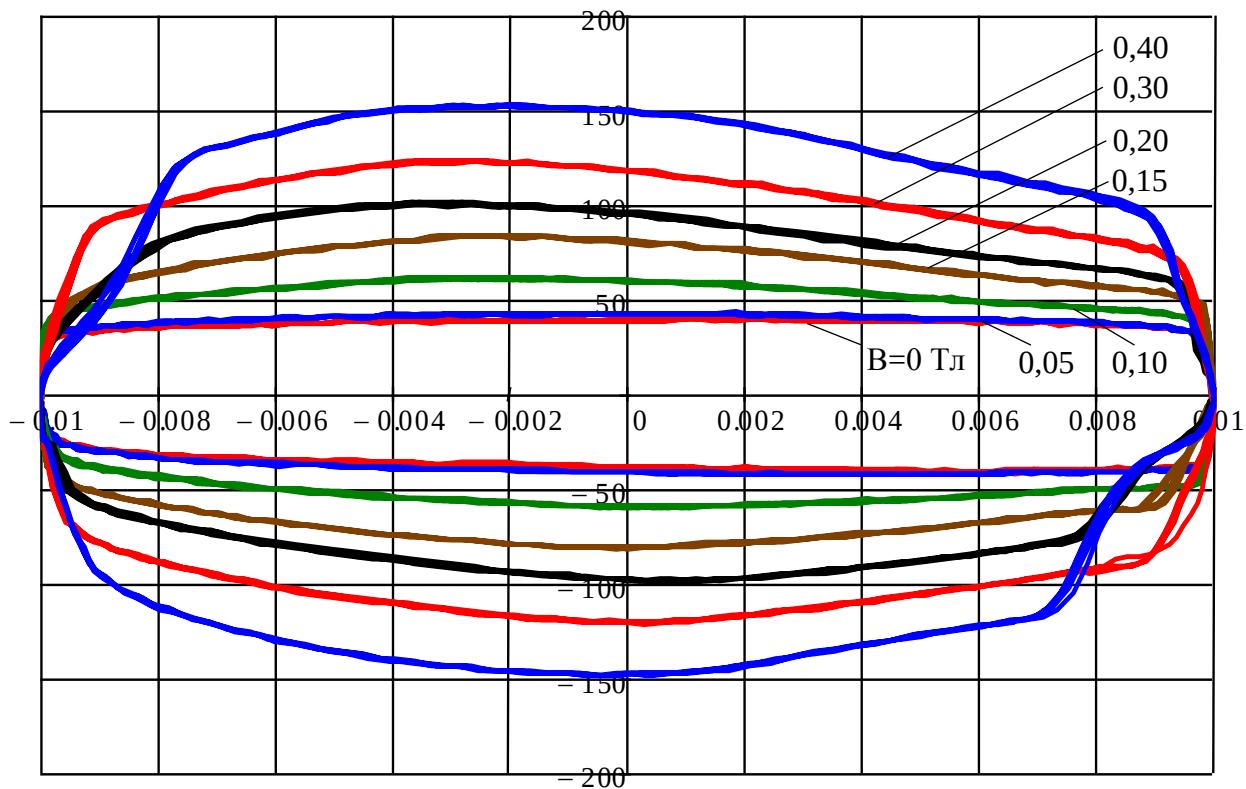


а)

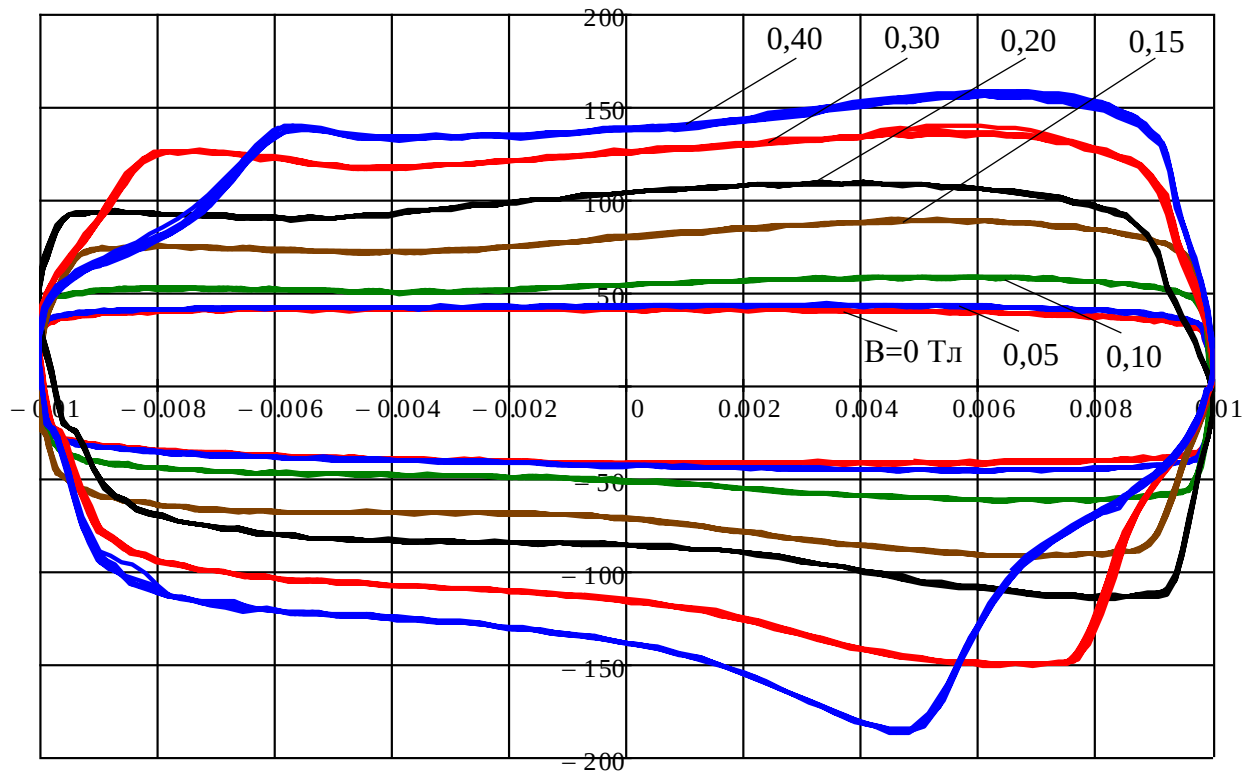


б)

Рисунок П1.11. Зависимости силы сопротивления демфера от положения поршня при частоте 0,6 Гц для разных индукций (немагнитный поршень):
а – положение 1; б – положение 2



а)



б)

Рисунок П1.12. Зависимости силы сопротивления демпфера от положения поршня при частоте 0,6 Гц для разных индукций (поршень с ферромагнитными элементами): а – положение 1; б – положение 2

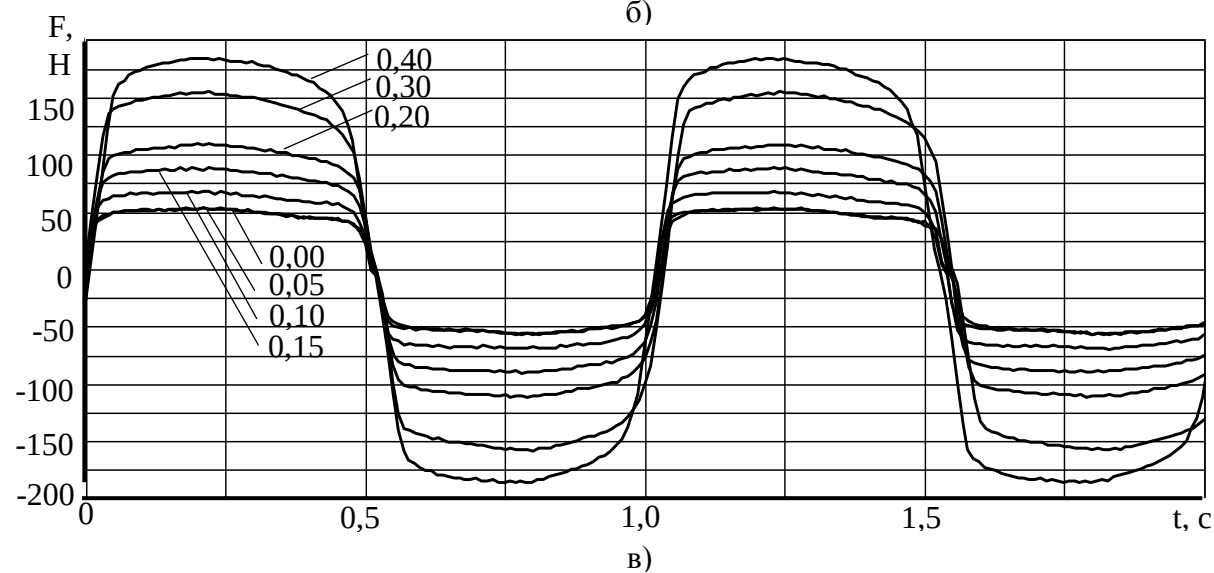
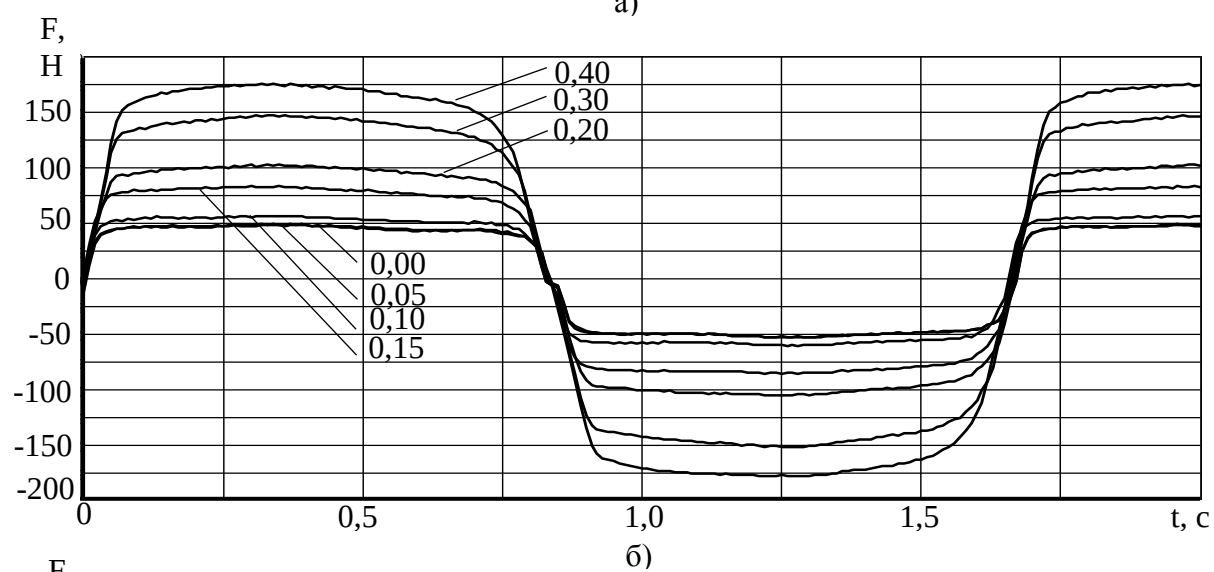
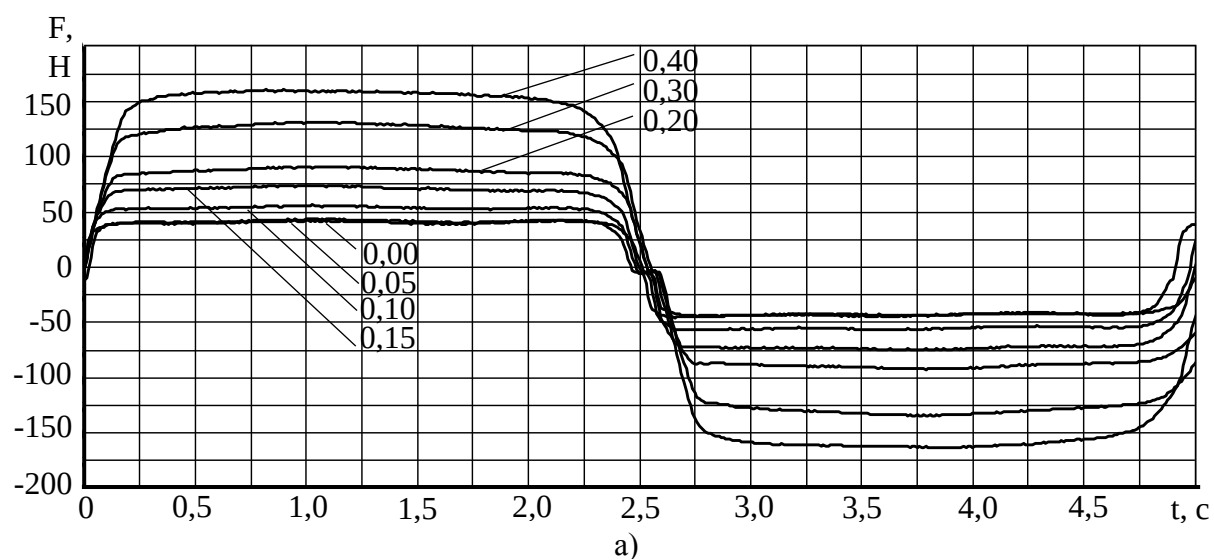


Рисунок П1.13. Зависимости силы сопротивления демпфера без полюсов на корпусе и с ферромагнитными элементами на поршне от времени (положение 2). а – частота колебаний 0,2 Гц;

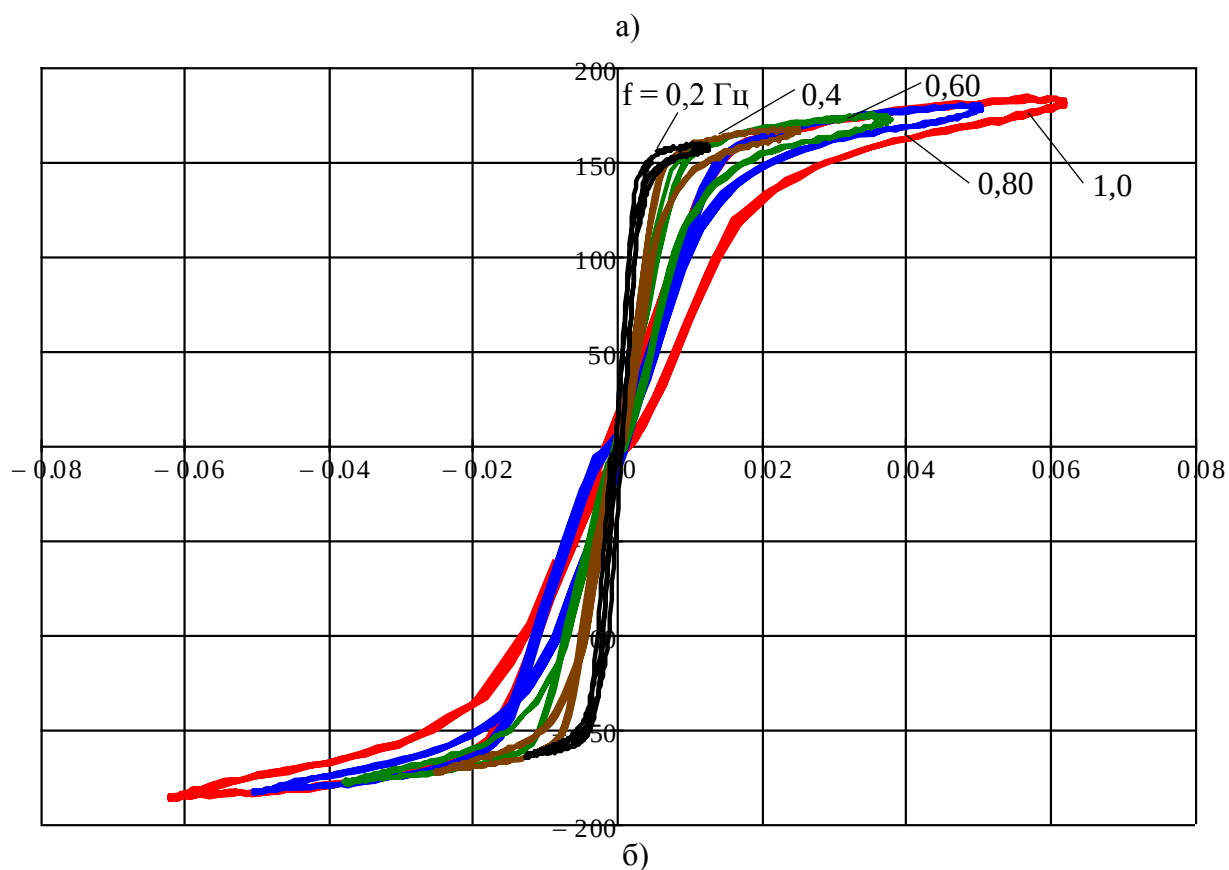
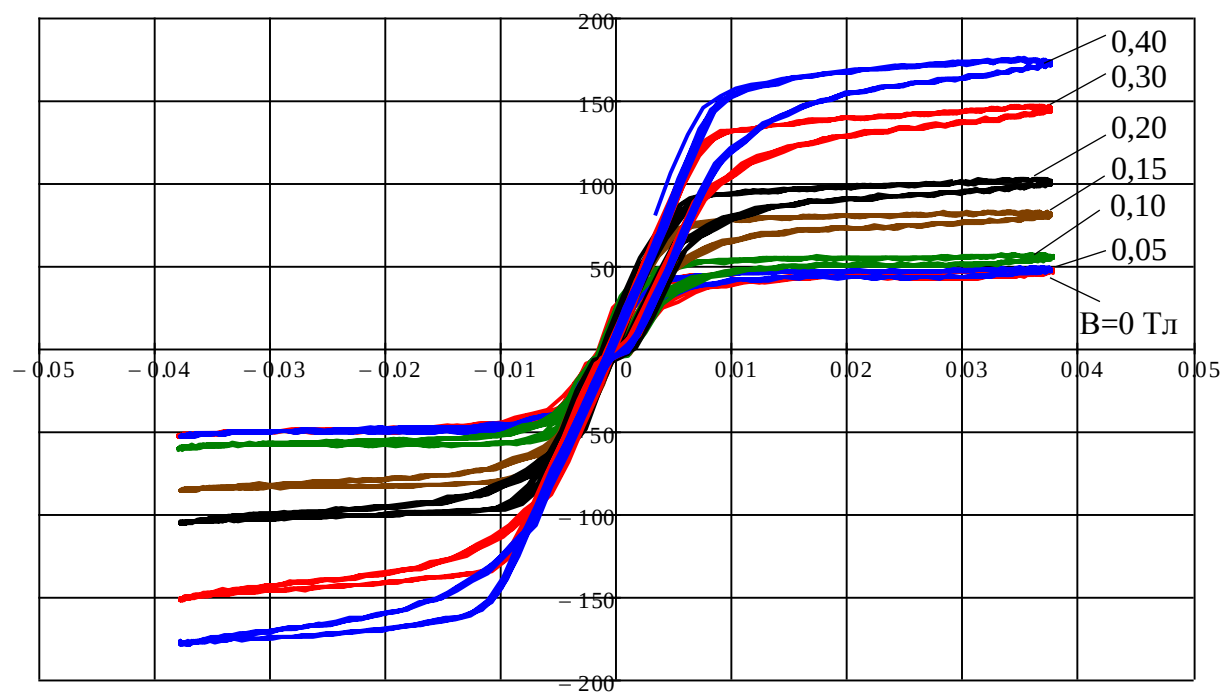
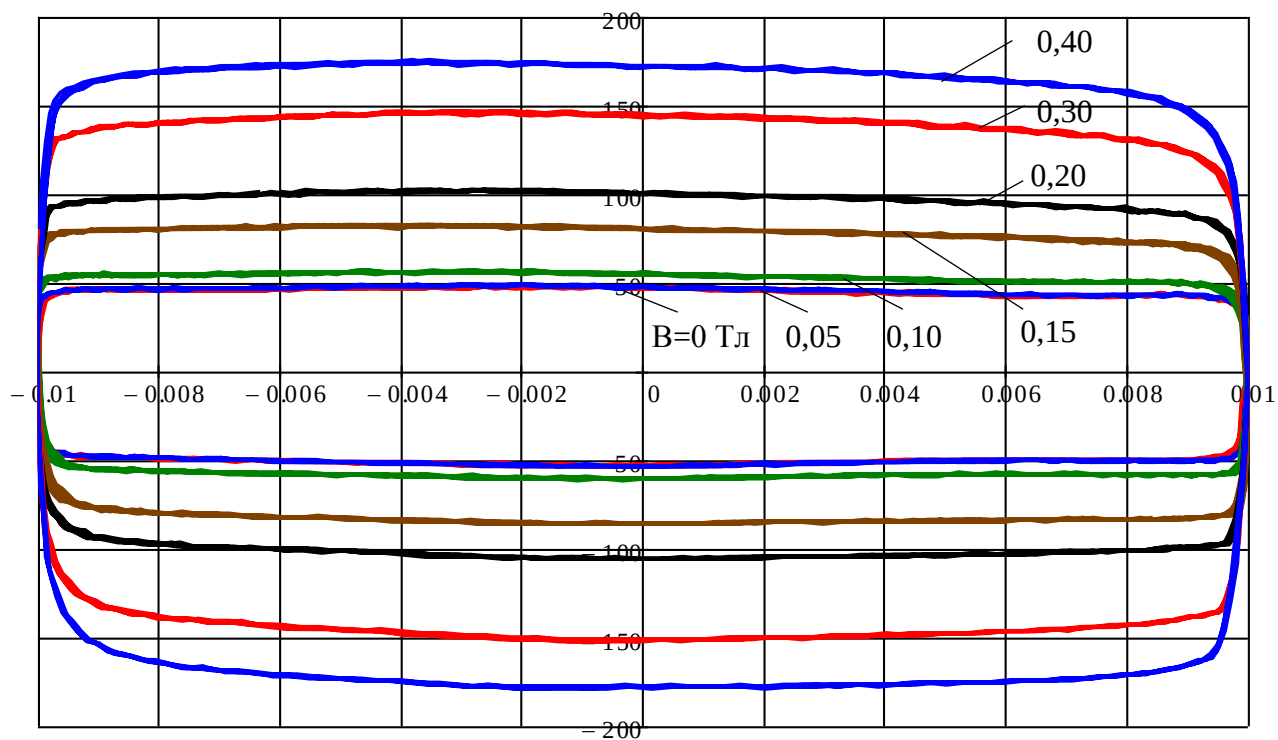
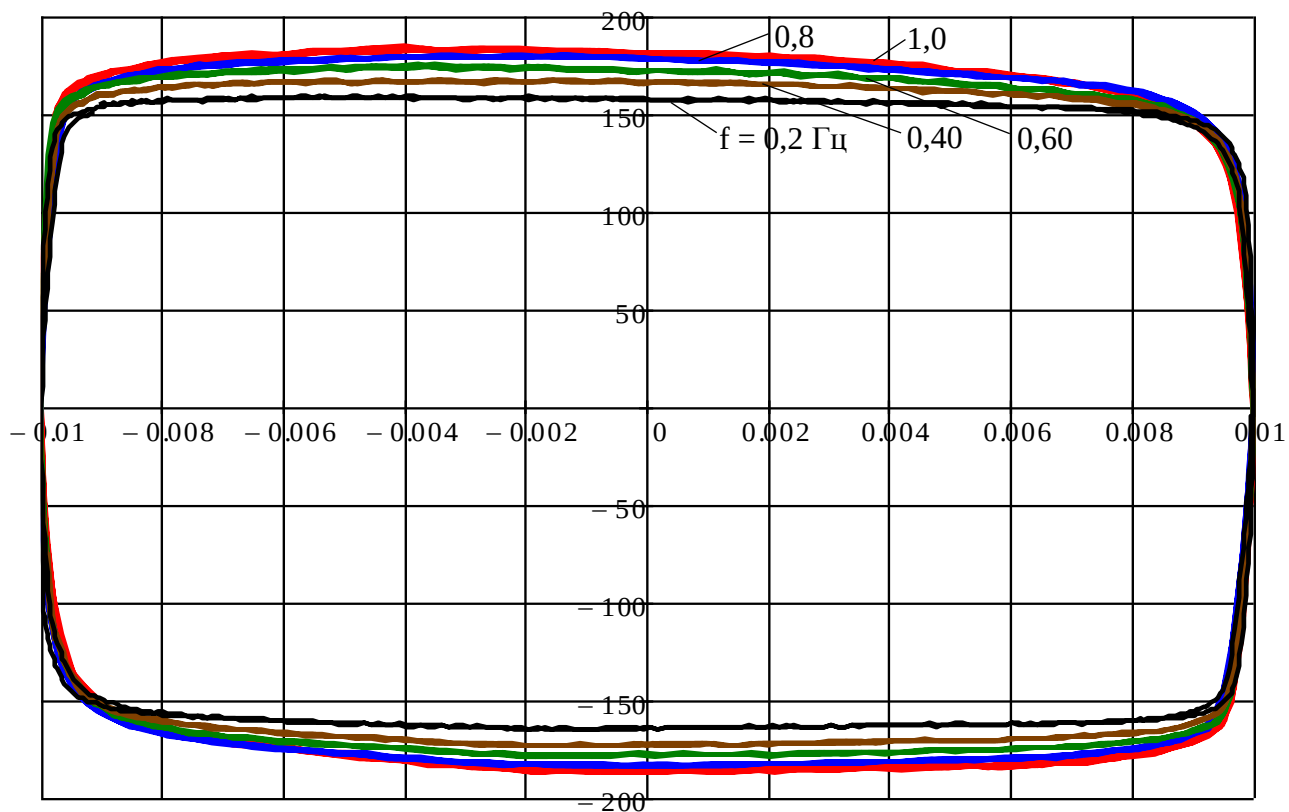


Рисунок П1.14. Зависимости силы сопротивления демпфера без полюсов на корпусе от скорости движения поршня для разных индукций при частоте 0,6 Гц (а) и для разных частот при индукции 0,4 Тл (поршень с ферромагнитными элементами)



а)



б)

Рисунок П1.15. Зависимости силы сопротивления демпфера без полюсов на корпусе от положения поршня при частоте $0,6$ Гц для разных индукций при частоте $0,6$ Гц (а) и для разных частот при индукции $0,4$ Тл (поршень с ферромагнитными элементами)

Приложение 2. Результаты интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2506476

**ПОРШНЕВОЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЙ
АМОРТИЗАТОР**

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)**

Автор(ы): **см. на обороте**

Заявка № 2012121982

Приоритет изобретения **28 мая 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **10 февраля 2014 г.**

Срок действия патента истекает **28 мая 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 506 476** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
F16F 9/53 (2006.01)
F16F 6/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012121982/11, 28.05.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.05.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.05.2012

(45) Опубликовано: 10.02.2014 Бюл. № 4

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2068513 C1, 27.10.1996. RU 2232316 C2,
10.07.2004. DE 102004043281 A1, 09.03.2006.
WO 9400704 A1, 06.01.1994.

Адрес для переписки:

153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
ИГЭУ, патентно-лицензионный отдел, О.Г.
Трухиной

(72) Автор(ы):

Морозов Николай Александрович (RU),
Нестеров Сергей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

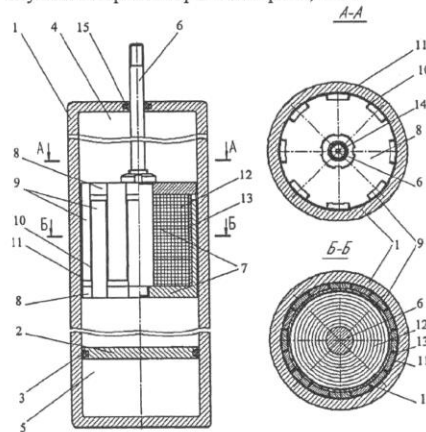
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина" (ИГЭУ) (RU)

(54) ПОРШНЕВОЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЙ АМОРТИЗАТОР

(57) Реферат:

Изобретение относится к машиностроению. Амортизатор содержит заполненный магнитной жидкостью цилиндрический корпус с компенсационной камерой. В корпусе размещены полый шток со сборным поршнем. Поршень состоит из двух частей, вложенных одна в другую, установленных с зазорами и образующих систему чередующихся полюсов. Каждая часть поршня содержит полюсный диск с полюсными пальцами. Величина зазоров между торцами полюсных пальцев и полюсными дисками противоположных частей поршня в 3-4 раза больше величины зазоров между полюсными пальцами. Катушка управления снабжена герметичным немагнитным цилиндрическим кожухом и расположена в полости, образованной штоком и полюсными дисками с полюсными пальцами. Корпус выполнен из немагнитного материала. Поршень установлен в корпусе с зазором.

Достигается расширение диапазона изменений силовой характеристики и увеличение срока службы амортизатора. 1 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2550793

**УПРАВЛЯЕМЫЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЙ
АМОРТИЗАТОР**

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013153796

Приоритет изобретения 04 декабря 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 14 апреля 2015 г.

Срок действия патента истекает 04 декабря 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11) 2 550 793 (13) C1

(51) МПК

F16F 9/53 (2006.01)

F16F 6/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013153796/11, 04.12.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.12.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.12.2013

(45) Опубликовано: 10.05.2015 Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 2005/0087409 A1, 28.04.2005. US
6279701 B1, 28.08.2001. SU 1796797 A1,
23.02.1993

Адрес для переписки:

153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ИГЭУ,
патентно-лицензионный отдел, Трухиной Ольге
Геннадьевне

(72) Автор(ы):

Морозов Николай Александрович (RU),
Нестеров Сергей Александрович (RU),
Казаков Юрий Борисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина" (ИГЭУ) (RU)

(54) УПРАВЛЯЕМЫЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫЙ АМОРТИЗАТОР

(57) Реферат:

Изобретение относится к машиностроению.
Управляемый магнитоэлектрический амортизатор
содержит корпус с магнитной жидкостью, в
котором установлен шток с поршнем, катушку
намагничивания, помещенные в кожух. Полусы
из ферромагнитного материала расположены в
кожухе снаружи корпуса, на которых размещены
катушки намагничивания. Поршень состоит из
чередующихся пластин, выполненных из

материала с высокой магнитной проводимостью,
и пластины, выполненных из материала с низкой
магнитной проводимостью. Пластины поршня
ориентированы вдоль оси полюсов. В пластинах
из материала с высокой магнитной
проводимостью выполнены дроссельные каналы.
Достигается увеличение диапанаона силовой
характеристики магнитоэлектрического
амортизатора. 1 ил.

RU 2 550 793 C1

RU 2 550 793 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015610008

**Автоматизированный комплекс расчёта работы и силы
прямоходового магнитоэлектрического демпфера**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Нестеров Сергей Александрович (RU), Морозов Николай
Александрович (RU), Казаков Юрий Борисович (RU)*

Заявка № 2014661331

Дата поступления 05 ноября 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 января 2015 г.



Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016615094

Программа для расчета силовой характеристики
прямоходового магнитожидкостного демпфера

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Ивановский
государственный энергетический университет имени В.И.
Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Автор: *Нестеров Сергей Александрович (RU)*



Заявка № 2016612419

Дата поступления 21 марта 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 мая 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение 3. Акты внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР «СплавТест»

ОКПО 37340469 ОГРН 1123702010816 ИНН 3702671580 КПП 370201001
153007, г. Иваново ул. Фрунзе д. 31 тел/факс: (4932) 93-55-55, mail@ivsplav.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

генеральный директор

 Васильева А.А.

«23» мая 2018 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Нестерова Сергея Александровича

Удостоверяем, что полученные в диссертационной работе Нестерова С.А. теоретические и практические результаты использованы при разработке электромеханического магнитожидкостного демпфера для прецизионного сварочного оборудования, позволившего повысить скорость стабилизации сварочного оборудования относительно свариваемых деталей, эффективно гасить колебательные процессы при сварке.

Главный инженер ООО НПЦ «СплавТест»



Зубков И.М.

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной работе ИГЭУ
Гусенков А.В.
«14» 09 2018 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Нестерова С.А.
в учебный процесс Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Ивановский
государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Удостоверяем, что результаты диссертационной работы Нестерова Сергея Александровича «Совершенствование моделей и конструкций поршневых электромеханических магнитожидкостных демпферов» используются в материалах занятий со студентами по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (бакалавриат) профиль «Электромеханика» в дисциплине «Электромеханические магнитожидкостные устройства» и 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (магистратура) профиль «Электромеханика» в дисциплине «Проектирование магнитожидкостных устройств».

Заведующий кафедрой Электромеханики
д.т.н. профессор

 Казаков Ю.Б.

к.т.н., профессор кафедры Электромеханики

 Страдомский Ю.И.