

На правах рукописи



Нестеров Сергей Александрович

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

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара 2018

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: Казаков Юрий Борисович
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой «Электромеханика» ФГБОУ
ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Официальные оппоненты: Коняев Андрей Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электротехника и
электротехнологические системы» ФГБОУ
ВО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» г. Екатеринбург

Рандин Дмитрий Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Электромеханика и авто-
мобильное электрооборудование» ФГБОУ
ВО «Самарский государственный техниче-
ский университет», г. Самара

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего обра-
зования «Южно-Российский государствен-
ный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова»

Защита диссертации состоится «26» февраля 2019 г. в 12 ч. на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу г. Самара, ул. Пер-
вомайская, 18, Самарский государственный технический университет,
корпус 1, ауд. 4а

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Самарского государственного технического университета (ул. Первомай-
ская, 18) и на сайте <https://samgtu.ru>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью)
просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская
244, Главный корпус, Самарский государственный технический универ-
ситет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс:
(846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.217.04

к.т.н.



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 магнитореологическими суспензиями или магнитными жидкостями (МЖ). В них возможно 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 эффекта применяются МЖ с большой долей магнитных частиц с нелинейной магнитной характеристикой и повышенным напряжением начального сдвига. Поршневые ЭМЖД находят применение в подвесках транспортных средств, сейсмозащите зданий и вантовых мостов, устройствах гашения колебаний трубопроводов, протезировании суставов и др.

При работе ЭМЖД имеют место взаимовлияющие электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы. Вязкость МЖ нелинейно зависит от магнитной 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 подчеркивает предоставленный РФФИ грант № 12-08-97516-р_центр_a «Разработка научных основ создания управляемых демпфирующих устройств с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей» выполненный в рамках научного направления в ИГЭУ.

Степень разработанности проблемы. Анализ источников свидетельствует о резком росте за последние годы числа патентов и публикаций по проблемам ЭМЖД (рис. 1). Наибольшее их число приходится на Китай, Японию, Корею, США и РФ. Основы применения МЖ в устройствах рассмотрены в трудах отечественных: Орлова Д.В., Гордеева Б.А., Библика З.П., Борина Д.Ю., Михайлова В. П. и др.; и иностранных ученых: Оденбаха Ш., Розенцвейга Р., Шлиомиса М.И., Шульмана Е.Е. и др. В работах Копылова И.П., Алиевского Б.Л., Коняева А.Ю. описаны специальные электромеханические устройства с использованием МЖ. Электротехническая система виброзащиты с магнитореологическим демпфером рассматривалась в работах Абакумова А.М., Рандина Д.Г. В работах Казакова

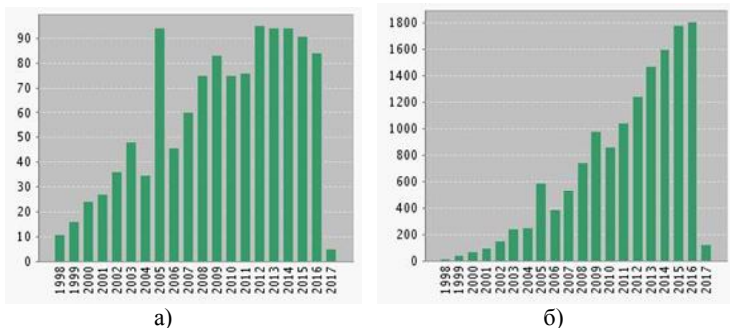


Рис.1. Число публикаций (а) и цитирований (б) в поисковой платформе Web of Science по запросу «magnetorheological fluid damper»

Ю.Б., Сарапулова Ф.Н., Фризена В.Э. 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 до настоящего времени в литературе отсутствуют.

Таким образом, совершенствование моделей и конструкций ЭМЖД представляет актуальную научно-техническую задачу.

Объект исследования: поршневой электромеханический магнито-жидкостный демпфер.

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

Цель диссертационной работы: повышение точности прогнозирования силовых характеристик и эффективности применения электромеханических магнито-жидкостных демпферов.

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 натурального 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: «... специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых ... устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии»; в части области исследования: п.1 «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования ... электромеханических преобразователей и электрических аппаратов»; п.3 «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии»; п.5 «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование ... электромеханических преобразователей и электрических аппаратов ...»; так как посвящена повышению эффективности электромеханических магнитоожидкостных 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 лицензированного 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.), «International Conference on Magnetic Fluids» (New Delhi, India, 2013 г.; Екатеринбург, 2016 г.), «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014» (Екатеринбург, УрФУ, 2014 г.), «Russian Conference on Magneto Hydrodynamics» (Пермь, Институт механики сплошных сред, 2015 г.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2016 г.), «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2016 г.).

Внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты использованы при разработке ЭМЖД для прецизионного сва-

точного оборудования в НПЦ «СплавТест», в учебном процессе ИГЭУ по дисциплинам профиля «Электромеханика».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 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.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 86 наименований, приложений и содержит 118 страниц основного текста, 76 рисунков и 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе поясняется эффективность использования магнитовязкостных свойств МЖ для создания ЭМЖД с регулируемой силой сопротивления. При отсутствии магнитного поля МЖ ведет себя как обычная жидкость. С приложением магнитного поля с индукцией \mathbf{B} магнитные частицы в МЖ выстраиваются по полю и структурируются в магнитные агрегаты, в результате МЖ проявляет неньютоновские свойства: появляются предел текучести τ_0 , а зависимость вязкости $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ слоев МЖ становится нелинейной. С ростом $\dot{\gamma}$ агрегаты в МЖ разрушаются, η снижается. МЖ ведет себя как псевдопластичное тело. Изменение η МЖ при изменении \mathbf{B} происходит с миллисекундными задержками.

Проведён анализ публикаций в области исследования. За последние годы наблюдается резкий рост числа патентов и публикаций по ЭМЖД и расширение номенклатуры устройств, использующих ЭМЖД. Преимуществами ЭМЖД являются возможность бесконтактного управления свойствами МЖ, способность развивать большие усилия, широкий диапазон регулировки силовой характеристики, малое время отклика и низкое энергопотребление. Рассмотрены достоинства и недостатки существующих конструкций ЭМЖД, отмечены возможные направления совершенствования исполнений.

При обосновании моделирования ЭМЖД отмечено взаимное влияние разнообразных физических процессов. Так, напряжение сдвига τ при наложении \mathbf{B} может увеличиться более чем в десять раз

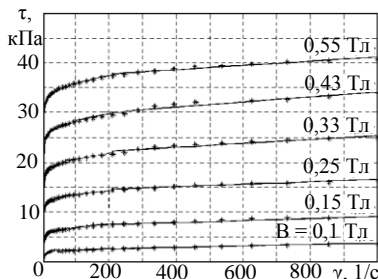


Рис. 2. Экспериментальные реологические характеристики МЖ при разных индукциях

и нелинейно зависит от γ (рис. 2).

Вязкостная диссипация энергии колебаний приводит к разогреву ЭМЖД. При повышении температуры T с 25 до 70 °С почти в два раза уменьшается τ . Соответственно вязкость МЖ является функцией скорости сдвига, температуры и индукции: $\eta = f(\gamma, T, B)$. В то же время намагниченности магнита и МЖ, магнитная проницаемость МЖ и магнитные свойства сталей зависят от B . Намагниченности магнита и МЖ, теплопроводность, η и магнитная проницаемость МЖ зависят от T . Температурное изменение намагниченности МЖ достигает $(0,1 \div 0,15) \text{ \%} / ^\circ\text{C}$. При наложении B теплопроводность МЖ в направлении поля возрастает до 15 %. Термомагнитная конвекция в МЖ повышает теплоотдачу. Магнитная индукция влияет на теплопроводность и вязкость МЖ и, соответственно, на тепловыделение. Профиль скорости течения МЖ в канале демпфера, определяющий расход МЖ и энергию поглощения ЭМЖД, зависит от нелинейности магнито-реологической характеристики МЖ и изменяется при воздействии B .

Сделан вывод о существенности взаимного влияния магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в ЭМЖД. Применяемые в настоящее время аналитические модели свойств ЭМЖД, основанные на допущении о полностью развитом течении МЖ, не учитывают влияние индукции и температуры, нелинейности магнито-реологических характеристик, напряжения начального сдвига, профиля скорости течения МЖ в канале демпфера. Очевидно, что при анализе работы ЭМЖД необходимо использовать уточненные модели ЭМЖД.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и анализу силовых характеристик ЭМЖД на основе аналитического решения задачи течения МЖ в канале демпфера с поперечным магнитным полем. Методики определения характеристик демпферов на жидкостях с постоянной вязкостью неприменимы для ЭМЖД. Ламинарность течения МЖ в зазоре ЭМЖД обусловлена большей вязкостью МЖ и стабилизирующим влиянием магнитного поля. Псевдопластичность и наличие предела текучести увеличивают устойчивость течений, затягивая переход к турбулентности.

Для описания магнито-реологических кривых МЖ (рис. 3) часто используется уравнение вязкопластичной модели Гершеля-Балкли

$$\tau = \tau_d(H) + K|\dot{\gamma}|^m, \quad (1)$$

где τ_d – динамический (кажущийся) пре-

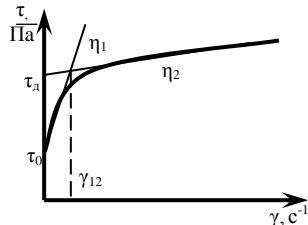


Рис. 3. Участки магнито-реологической кривой МЖ

дел текучести; H – напряжённость магнитного поля; m , K – параметры жидкости. При $m = 1$ (1) переходит в модель Бингама.

Недостаток (1) в том, что они не учитывают начальный участок реологической кривой и напряжение начального сдвига τ_0 . Это даёт неверные результаты при малых γ , тогда как демпфер за один период колебаний дважды проходит через точку $\gamma = 0$.

При кусочно-линейной аппроксимации реологической кривой МЖ несколькими участками возможен учёт начальной части характеристики. При этом в профиле скорости течения МЖ в канале ЭМЖД можно выделить области с постоянными η , характерными для каждого линеаризованного участка (рис. 4). Профиль поля скоростей в щелевом канале ЭМЖД при напорном течении обычной вязкой жидкости параболический. У стенку канала γ велика и η МЖ небольшая, тогда как по центру канала ЭМЖД γ мала, а η значительна. Поэтому профиль поля скоростей МЖ в зазоре ЭМЖД параболический с уплощением, которое тем сильнее, чем больше B .

Конфигурация осесимметричной модели поршневого ЭМЖД, представленная на рис. 5, состоит из ферромагнитного корпуса 1, заполненного МЖ 2, штока 3 с поршнем, состоящим из катушки возбуждения 4 и двух ферромагнитных полюсов 5. Между поршнем и корпусом имеется зазор для протекания МЖ.

Область диссипации энергии в ЭМЖД представляет собой чередующиеся участки с присутствием и отсутствием магнитного поля (полюса и межполюсные пространства). В межполюсном пространстве магнитная индукция отсутствует и МЖ не подвержена воздействию магнитного поля. Вязкость МЖ равна η_0 , профиль скорости течения в межполюсном пространстве параболический. Профиль скорости потока и вязкость МЖ на участках различны, но средняя скорость течения v_{cp} и расход Q остаются постоянными. Q тем меньше, чем больше тормозящий эффект магнитного поля.

Разработана аналитическая процедура определения v_{cp} МЖ в щелевом канале ЭМЖД с тремя характерными областями (стержневая и две пристеночные) при представлении магнитореологической характеристики

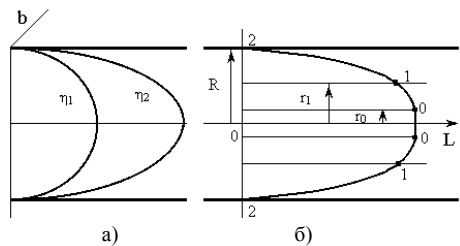


Рис. 4. Профили скоростей течения МЖ:

а) – с постоянной вязкостью;

б) – с вязкостью, зависящей от скорости сдвига

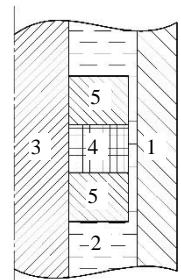


Рис. 5. Конфигурация модели

двумя линейными участками с разными η и учетом τ_0 . Расход МЖ определяется как

$$Q_{\Sigma} = \frac{2\Delta p b (R^3 \eta_1 - r_0^3 \eta_2 + r_1^3 (\eta_2 - \eta_1))}{3\eta_1 \eta_2 L}, \quad (2)$$

где $\Delta p = F / S_{\text{пор}}$ – перепад давления, определяемый силой F действующей на поршень и его сечением $S_{\text{пор}}$; L , $2R$ и b – длина, толщина и ширина щелевого канала, r_1 – граница разделения областей течения МЖ с вязкостями η_1 и η_2 , $r_0 = \tau_0 L / \Delta p$ – граница области по оси канала, где скорость течения будет одинаковой.

Разработан оригинальный алгоритм, итерационная процедура и автоматизированный комплекс расчёта для определения скорости движения поршня, соответствующей силе сопротивления ЭМЖД. На рис. 6 представлены рассчитанные силовые характеристики ЭМЖД для разных B . Здесь, в отличие от (1), учитывается начальный участок магнитореологической характеристики, τ_0 , изменение вязкости МЖ, реальный профиль скоростей течения МЖ в канале демфера, влияние магнитной индукции. Выявлено, что при не учёте τ_0 , использование соотношения (1), погрешность в определении усилия на начальном участке может достигать более 50 %. В то же время недостатком аналитических моделей является привязка к конструктивному исполнению рабочей зоны ЭМЖД и невозможность получения точного решения для каналов сложной формы.

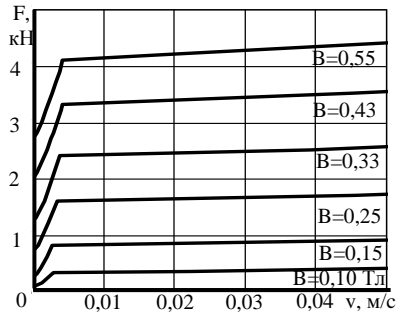


Рис. 6. Силовые характеристики ЭМЖД

В третьей главе рассмотрено конечно-элементное моделирование ЭМЖД с учётом взаимного влияния различных физических явлений. Известны работы по расчёту электромагнитного поля и экспорту получаемых результатов в гидродинамический расчёт, однако нет публикаций об исследованиях, посвящённых комплексному конечно-элементному анализу физических полей в ЭМЖД с учётом их взаимного влияния. Взаимосвязь магнитных, гидродинамических и тепловых полей в ЭМЖД проявляется во влиянии параметров одних полей на характеристики сред и возбуждающие факторы других полей, что может быть учтено в виде обратных связей, которые можно представить в виде схемы на рис. 7 (Λ – проводимость путей прохождения магнитного потока через МЖ, зависящая от конфигурации МЖ в канале демфера, профиля скоростей течения).

Для исследования была использована среда конечно-элементного моделирования Comsol Femlab™, позволяющая учитывать взаимодействия различных физических явлений на общей сетке. Созданная комплексная модель, включающая в себя расчёт электромагнитного,

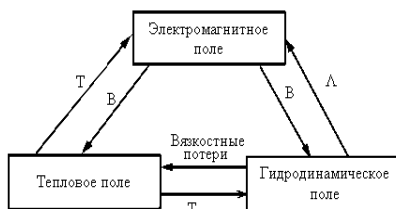


Рис. 7. Взаимосвязь полей в ЭМЖД

гидродинамического, термодинамического полей с использованием перестраивающихся в процессе моделирования сеток, позволяет оценивать процессы, происходящие в ЭМЖД с учётом их взаимного влияния. Для уменьшения времени расчёта задача формулировалась в двумерной осесимметричной постановке. При имитации движения поршня сетка деформировалась без изменения числа элементов. Профиль скорости потока МЖ сильно неравномерен, у стенок поршня и корпуса присутствуют области с большими градиентами сдвига, где, соответственно, нужна более мелкая конечно-элементная сетка. Учитывались нелинейные магнитные характеристики используемых сталей и МЖ. Вихревые токи не учитывались, так как катушка возбуждения питается постоянным током, а скорость движения и частота колебания поршня достаточно малы. Электромагнитный расчёт основывался на уравнениях Максвелла, гидродинамический расчёт - на уравнениях Навье-Стокса.

Для вязкости МЖ, имеющей выраженную температурную зависимость, использовано соотношение
$$\eta_T = \eta_{20} \left(1 - C_T \left(\frac{T - 293}{293} \right) \right), \quad (3)$$

где η_{20} – вязкость МЖ при 293 К, $C_T = 1,9$ – температурный коэффициент.

Задача сопряжённого теплообмена решалась в области МЖ и в элементах ЭМЖД. Выделение тепла происходит из-за вязкостной диссипации энергии в МЖ и в катушке возбуждения в виде электрических потерь. В МЖ теплообмен осуществляется конвекцией и теплопроводностью, в твёрдых элементах - теплопроводностью.

Для учёта нелинейности η МЖ использовано уравнение Карро, хорошо описывающее неньютоновские жидкости с сильной зависимостью $\eta = f(\gamma)$

$$\eta(\gamma) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left[1 + (K_1 \gamma)^2 \right]^{(n-1)/2}, \quad (4)$$

где η_∞ – динамическая вязкость МЖ при бесконечно большой γ (наименьшая); η_0 – динамическая вязкость МЖ при малой γ (максимальная); K_1 – постоянная; $n=0.02$.

Зависимости $\eta_{сз}$, η_0 , K_1 от B представлены на рис. 8. Учет этих зависимостей позволяет корректно формировать математические модели магнито-реологических характеристик МЖ.

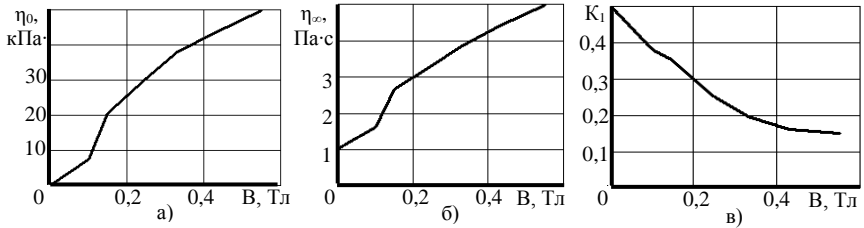


Рис. 8. Зависимости динамической вязкости МЖ при малой (а) и бесконечно большой (б) скоростях сдвига, зависимость временной постоянной K_1 (в) от магнитной индукции

По результатам взаимосвязанных расчетов полей выявлено, что при намагничивающей силе (НС) катушки возбуждения 350 А индукция магнитного поля в зазоре между поршнем и корпусом демфера достигает 0,3 Тл под полюсом и уменьшается в межполюсном пространстве до 0,02 Тл. Вязкость МЖ возрастает до 2,8 кПа в областях с большей индукцией и снижается до 0,15 кПа в межполюсном пространстве, что свидетельствует о сильной взаимосвязи магнитных и гидродинамических явлений в МЖ. Одновременно с ростом скорости движения поршня от 0,025 до 0,25 м/с вязкость МЖ в зазоре уменьшается на десятки процентов сложным образом, обусловленным магнитной индукцией и скоростью сдвига слоёв МЖ.

На рис. 9 представлено изменение профилей скорости течения МЖ в зазоре ЭМЖД при НС катушки 350 А и $V_{пор} = 0,01 - 0,05$ м/с. Профиль скорости под полюсом (кривые 1) имеет уплощение по оси канала. С ростом $V_{пор}$ разница между скоростями под полюсом и межполюсным пространстве (кривые 2) увеличивается. На рис. 10 представлено изменение Δp по высоте поршня при разных НС катушки.

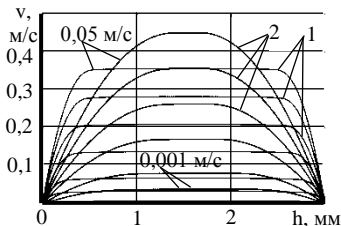


Рис. 9. Изменение профиля скорости в зазоре ЭМЖД при росте скорости движения поршня от 0,01 до 0,05 м/с

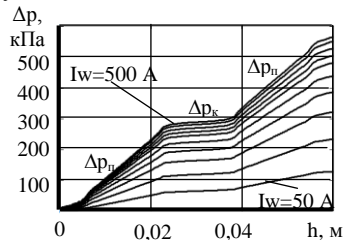


Рис. 10. Перепад давления по высоте поршня для скорости движения поршня 0,1 м/с

При наличии магнитного поля в зазоре график перепада давления разбивается на 3 участка из-за резкого изменения вязкости МЖ. Это связано с неравномерным распределением вязкости МЖ в зазоре по высоте поршня. Увеличение НС катушки в 10 раз приводит к увеличению перепада давления в 4,5 раза. Увеличением магнитной индукции может быть достигнут более чем восьмикратный рост силы ЭМЖД. Расход среды при движении поршня одинаков в любом сечении щелевого зазора. Потери напора Δp различны и зависят от эффективной вязкости МЖ на данном участке.

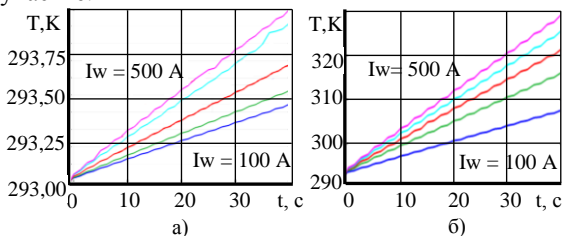


Рис. 11. Температура МЖ в зазоре демпфера при гармонических колебаниях поршня: а – зазор 3 мм; б – зазор 1

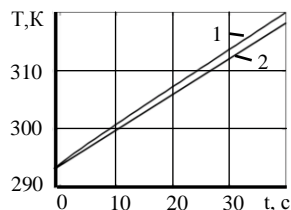


Рис. 12. Температура МЖ с учётом (2) и без учёта (1) зависимости вязкости от T при $V=0,3$ Тл и зазоре 1 мм

При вязкостной диссипации энергии колебаний в МЖ при движениях поршня элементы демпфера разогреваются. На рис. 11 представлено изменение температуры МЖ в зазоре за время работы демпфера. Изменение температуры МЖ с учётом уменьшения ее вязкости с ростом температуры, представлено на рис. 12. На рис. 13 представлено изменение силы сопротивления ЭМЖД без и с учётом зависимости $\eta(T)$. Уменьшение вязкости МЖ при нагреве приводит к уменьшению силы ЭМЖД. Так, при повышении температуры МЖ на 33°C сила сопротивления ЭМЖД уменьшается на 16,5%

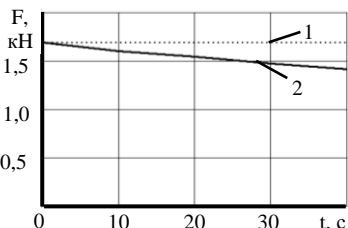


Рис. 13. Сила ЭМЖД при $V = 0,3$ Тл с учётом (2) и без учёта (1) изменения вязкости МЖ с изменением T

Проведено сравнение силовых характеристик по результатам аналитического расчёта и конечно-элементного моделирования (рис. 14). Зависимость 1 получена по методике с представлением МЖ вязкопластичным телом Шведова-Бингама, зависимость 2 – по методике, приведённой во 2 главе. Характеристи-

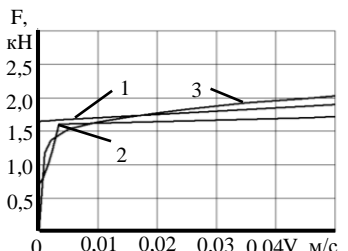


Рис. 14. Сила сопротивления ЭМЖД для индукции 0,25 Тл

ка 3 получена по результатам конечно-элементного моделирования. При больших $V_{пор}$ разность между результатами конечно-элементного моделирования и аналитических решений не превышает 15 % и в первую очередь обусловлена учетом влияния магнитного поля в межполюсном пространстве на вязкость МЖ. В аналитических моделях поле в межполюсном пространстве не учитывается. В то же время конечно-элементная модель не учитывает первоначальную силу «трогания» демпфера из-за начального напряжения сдвига в МЖ при воздействии магнитного поля.

Таким образом, на основе метода конечных элементов разработана полевая модель ЭМЖД с учётом взаимного влияния электромагнитных, феррогидродинамических и тепловых процессов.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию и совершенствованию конструкции ЭМЖД.



Рис. 15. Стенд для испытания ЭМЖД

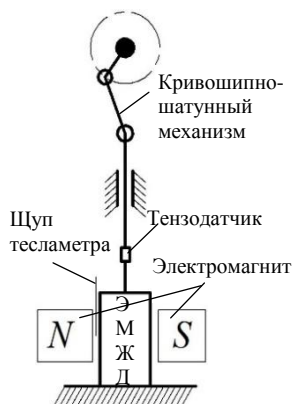


Рис. 16. Принципиальная схема экспериментальной установки

Разработана автоматизированная экспериментальная установка (рис. 15) для испытаний ЭМЖД с ферромагнитными элементами на поршне и с немагнитным поршнем. Двигатель через редуктор приводит в движение кривошипно-шатунный механизм, вызывающий вынужденные гармонические колебания поршня (рис. 16). Частота вращения двигателя контролируется ЭВМ через интерфейсную плату ввода/вывода сигналов NI PCI 6023E. Динамометрическое тензорезистивное устройство YZC-516С со штока демпфера передает сигнал на коннектор и далее в ЭВМ. Демпфер размещен между полюсами электромагнита, изменение тока в катушках которого позволяет менять индукцию от 0 до 2 Тл. Магнитная индукция измерялась тесламетром WT10А. Опыты проводились при гармонических колебаниях с амплитудой 10 мм, частотами $f=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ и 1,0 Гц для $B=0, 0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,3$ и 0,4 Тл. при $T_0 = 20$ °С. Использо-

валась МЖ ПНИЛ ПФГД ИГЭУ на основе жидкости ПЭС-4 с динамической вязкостью 48 сСт и дисперсной фазой из смеси высокодисперсного магнетита со средним диаметром частиц $D_{cp} = 10$ нм и карбонильного железа с $D_{cp} = 2$ мкм, взятых в соотношении 1:1. Сочетание высокодисперсных и микрогетерогенных частиц делает суспензию более устойчивой. Объемная доля дисперсной фазы в МЖ составила 20%. При $V = 0,5$ Тл МЖ насыщается и относительная магнитная проницаемость уменьшается с 2,1 до 1,4. Вид магнитореологических характеристик МЖ подобен рис. 2.

Гармонические колебания поршня совершались относительно двух начальных положений. В «положении 1» (рис.17,а) верхний и нижний края поршня совпадают с краями полюсов корпуса. В «положении 2» (рис.17,б) верхний край поршня совпадает с нижним краем верхнего полюса корпуса. На рис.17 приведены основные геометрические размеры изготовленной модели. На рис. 18 показаны два исполнения поршня. Использование поршня с ферромагнитными элементами позволило исследовать влияние эффекта магнитной пружины, возникающего при боковом смещении двух магнитопроводящих деталей, вызывающих уменьшение их общей проводимости магнитному потоку, на силовую характеристику ЭМЖД.

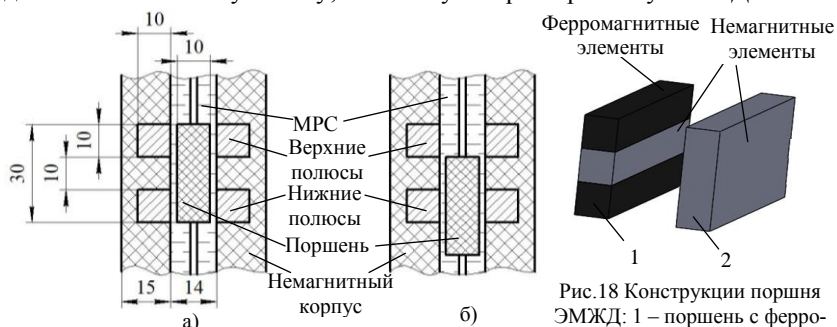


Рис. 17. Начальные положения поршня:
а – положение 1; б – положение 2

Рис.18 Конструкции поршня ЭМЖД: 1 – поршень с ферромагнитными элементами, 2 – немагнитный поршень.

Экспериментально подтверждено многократное увеличение силы сопротивления ЭМЖД с ростом индукции. В отсутствии магнитного поля сила демпфирования, например, при $f = 0,6$ Гц, составляет 35 Н. С немагнитным поршнем при $V = 0,4$ Тл сила составляет 125 Н, контролируемое усилие около 90 Н. Для ЭМЖД с ферромагнитными элементами на поршне сила демпфирования зависит от среднего положения поршня. Когда поршень в середине двойной амплитуды находится в «положении 1» эта сила составляет около 150 Н и одинакова при движении поршня вверх и вниз, контролируемое усилие составляет 115 Н. Если в середине двойной амплитуды поршень находится в «положении 2», то максимальная сила сопротивления около 155 Н достигается при движении поршня вверх,

контролируемое усилие составляет 120 Н (рис. 19). При движении поршня вниз максимальная сила сопротивления составляет около 185 Н, контролируемое усилие 150 Н.

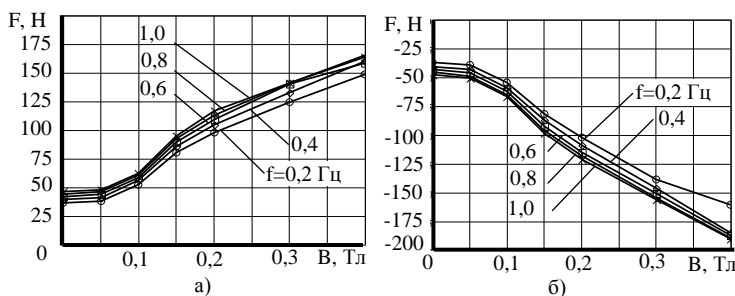


Рис. 19. Зависимость максимальной силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции (положение 2). Поршень с ферромагнитными элементами:
а – движение поршня вверх; б – движение поршня вниз

Использование эффекта магнитной пружины позволяет получить несимметричную силовую характеристику, например, увеличить силу отбоя и уменьшить силу сжатия без применения клапанов и золотников. Отказ от подвижных частей увеличивает надёжность демпфера.

На рис. 20 представлены экспериментальные и расчетные, на основе конечно-элементной модели, силовые характеристики демпфера. Погрешность расчетов менее 7 %.

Далее в главе представлены направления повышения эффективности ЭМЖД путем увеличения магнитной индукции в областях диссипации энергии в движущейся МЖ, протяжённости дроссельных каналов, уменьшения потоков рассеяния, перегревов МЖ, использованием эффектов центрирования немагнитных тел в МЖ и магнитной пружины для дополнительной настройки силовой характеристики демпфера. Предложены две патентозащищенные конструкции усовершенствованных поршневых ЭМЖД, обеспечивающие повышение эффективности их работы с возможностью регулировки силовой характеристики изменением вязкости МЖ электромагнитным способом.

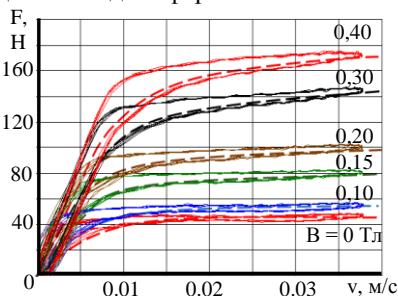


Рис. 20. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные, на основе конечно-элементной модели (штриховые линии), силовые характеристики демпфера

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложениях приведены данные экспериментов, патенты, свидетельства на программные продукты и акты внедрения результатов работы.

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:

1. 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).

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

3. 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%).

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

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

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

7. Разработанный опытный автоматизированный стенд и проведённые экспериментальные исследования силовых характеристик ЭМЖД с изменяемой электромагнитным способом силой сопротивления подтвердили достоверность теоретических исследований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Нестеров, С.А. Разработка моделей электромеханического магнито-реологического 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
2. 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.
3. Казаков, Ю. Б. Исследование взаимосвязанных процессов в магнито-жидкостном демпфирующем устройстве / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2014. – Вып. 6. – С.44-48.
4. Казаков, Ю. Б. Расчётный анализ силовой характеристики электромеханического магнито-жидкостного демпфера / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Вестник ИГЭУ. - Иваново, 2015. -Вып. 4. - С.17-22.

Монография:

5. Морозов, Н.А. Управляемые демпфирующие устройства с использованием нанодispersных магнитных жидкостей / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков, **С.А. Нестеров**, И.М. Арефьев. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", 2016. – 148 с.

Статья, индексируемая в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

6. 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.

Результаты интеллектуальной деятельности:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615094 «Программа для расчета силовой характеристики прямоходового магнито-жидкостного демпфера» / **С.А. Нестеров**. - Зарегистр. 16.05.2016.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610008 «Автоматизированный комплекс расчёта работы и силы прямоходового магнито-жидкостного демпфера» / **С.А. Нестеров**, Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. - Зарегистр. 12.15.2015.
9. Патент на изобретение № 2506476 РФ «Поршневой магнито-жидкостный амортизатор» / Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** - Опубл. 10.02.2014. Бюл. № 4. - 7 с.
10. Патент на изобретение № 2550793 РФ «Управляемый магнито-жидкостный амортизатор» / Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров**, Ю.Б. Казаков - Опубл. 10.05.2015. Бюл. № 13. – 5 с.

Другие издания:

11. Казаков, Ю.Б. Типовые конструкции демпферов на основе нанодispersных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** //

15 межд. Плесская научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям – Иваново: ИГЭУ, 2012. – С. 307 – 314.

12. Казаков, Ю.Б. Моделирование демпфера с нанодисперсной магнитореологической жидкостью и поршневой магнитной системой / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Сб. материалов IV Межд. конф. «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». – М.: ИМЕТ РАН, 2012. – С. 109-110.

13. Молчанов, С.А. Моделирование распределения электромагнитного поля магнитожидкостного демпфера с помощью системы ANSYS MAXWELL / С.А. Молчанов, **С.А. Нестеров**, Н.А. Морозов // Математическое моделирование в энергетике с использованием программной системы ANSYS. Матер. научн.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. «Энергия 2012». – Иваново: ИГЭУ, 2012. – Т. 8. С. 50-53.

14. Kazakov, Yu.B. The Flowing of Magnetic Fluid in the Gap with the Magnetic Fields with different Values of Strength / Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, **S.A. Nesterov** // 13 International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-13): Book of Abstracts. – India, New Delhi. - CSIR-National Physical Laboratory, 2013. - P. 318-319.

15. Казаков, Ю.Б. Управляемые демпфирующие устройства на основе нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Труды 14 Междун. конф. «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ)». – МЭИ, Алушта, 2014. - С 54 – 55.

16. Казаков, Ю.Б. Магнитожидкостный демпфер с регулируемой жёсткостью / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Сб. научн. тр.: Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014). - Екатеринбург, УрФУ, 2014. С. 179 – 183.

17. Kazakov, Yu.B. Numerical and analytical analysis of a magneto-rheological damper / Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, **S.A. Nesterov** // Russian Conference on Magneto Hydrodynamics: Book of Abstracts. – Perm, Russia, 2015. – С. 42.

18. Нестеров, С.А. Численное моделирование взаимосвязанных физических полей в магнитожидкостном демпфирующем устройстве / **С.А. Нестеров** // Матер. 10 межд. научн.-техн. конф. студ., асп. и мол. уч. «Энергия -2015». – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 4. - С. 53-55.

19. Нестеров С.А. Расчёт силовой характеристики магнитожидкостного демпфера / **С.А. Нестеров** // Матер. межд. научн.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). - Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3.- С. 160 – 163.

20. Казаков, Ю.Б. Аналитическое и численное моделирование магнитожидкостного демпфирующего устройства / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // V Всерос. науч. конф. с межд. участием «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем». Сб. науч. тр. - Ставрополь: Изд.-информ. центр «Фабула», 2015. – С. 132 – 137.

21. Kazakov, Yu.B. Development of Models of the Magnetorheological Fluid Damper / Yu.B. Kazakov, N.A. Morozov, **S.A. Nesterov** // 14 International Conference on Magnetic Fluids (ICMF-14): Book of Abstracts. – Russia, Ekaterinburg: УрФУ, 2016. – P. 171.

22. Казаков, Ю.Б. Взаимосвязанные физические процессы в электромеханическом магнитожидкостном демпфере / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // 17 межд. Плесская научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям – Иваново: ИГЭУ, 2016. – С. 66 – 73.

23. 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: сб. матер. VII Всерос. научно-практ. конф. - Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарноспасательная академия ГПС МЧС России, 2016. - С. 52-56.

24. Морозов, Н.А. Разработка моделей магнитожидкостного демпфирующего устройства / Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. 22 Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. - М.: Изд. дом МЭИ, 2016. - Т. 2. С. 16.

25. Казаков, Ю.Б. Инерционный магнитожидкостный демпфер / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, А.Н. Морозов, **С.А. Нестеров** // VI Всерос. науч. конф. с межд. участием «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» / Сб. науч. тр. - Ставрополь: Изд.-полиграф. комплекс ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017. – С. 206 – 213.

26. Нестеров, С.А. Экспериментальное исследование электромеханического магнитожидкостного демпфирующего устройства / **С.А. Нестеров**, Н.А. Морозов, И.М. Арефьев // VI Всерос. науч. конф. с меж. участием «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» / Сб. науч. тр. - Ставрополь: Изд.-полиграф. комплекс ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017. – С. 219 – 225.

27. Казаков, Ю.Б. Совершенствование конструкции магнитожидкостного демпфера / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, **С.А. Нестеров** // Mat. межд. научн.техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). - Иваново: ИГЭУ, 2017. Т.3. – С. 214 – 217.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 12 от 18 декабря 2018 г.)

Заказ № ____ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244