

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ**

На правах рукописи

КОРОБКО Евгения Викторовна

УДК 532.135:531.212

**ГИДРОМЕХАНИКА
ЭЛЕКТРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев 1996



00751918 (V)

AB 35.048

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в академическом научном комплексе
"Институт тепло-и массообмена им А.В.Лыкова"
Академии наук Беларуси

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ

- доктор технических наук
профессор ШУЛЬМАН З.П.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- доктор физико-математических наук
профессор Селезов И.Т.

- доктор технических наук
Юркевич О.Р.

- доктор физико-математических наук
профессор Литвинов В.Г.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

- Донецкий Государственный Университет

Защита диссертации состоится "20" 06 1996 г. в 14 часов
на заседании специализированного совета Д 01.04.01 в Институте
гидромеханики Национальной Академии наук Украины по адресу:
252057, Киев, ул.Желябова, 8/4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
гидромеханики НАН Украины.

Автореферат разослан "18" 05 1996

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук

С.И. Криль



Актуальность темы диссертации. Будущее развитие большинства технологий связано не с рационализацией, усовершенствованием и модификацией традиционных методов и оборудования, а с разработкой и внедрением принципиально новых подходов, сочетающих высокoeffективные воздействия с уникальными возможностями "умных" материалов. Весьма перспективно управление механическими свойствами текучей среды с помощью электрических полей. При этом особенно эффективно их воздействие на дисперсные среды типа взвесей - минеральных композиций, а также смазок и слабопроводящих дисперсий. Электроструктурированные жидкости (ЭРЖ) - особый класс суспензий слабопроводящих частиц ($I-I0\text{ мкм}$) в диэлектрической дисперсионной среде. Они откликаются на электрический сигнал почти мгновенной радикальной перестройкой своей внутренней структуры. Реологическая специфика и текучесть (электрореологический эффект -ЭРЭ) таких сред обычно связываются с динамическими структурными превращениями в системе.

Применение ЭРЖ перспективно в различных гидравлических устройствах: гидроприводах станков, роботов, подъемно-транспортных машинах, гидротормозах, бесступенчатых муфтах сцепления, гидроклапанах без движущихся деталей, амортизаторах колебаний и т.п. Потенциально уже сейчас они способны заменить 50% традиционно применяемых жидкостей для гидравлических систем и гидроавтоматики, что обещает дать значительный экономический выигрыш.

Несмотря на столь многообещающие перспективы, лишь в последнее десятилетие намечился определенный прогресс в использовании ЭРЖ. Связано это с появлением на рынке эффективных рецептур, отвечающих требованиям высокого прироста электровязкости, повышенной седиментационной и температурной устойчивости. Выяснилось, что многофакторность явления требует привлечения знаний и опыта работы на стыке многих дисциплин: гидравлики, механики деформируемого тела, реологии, материаловедения, коллоидной химии и химии поверхности, оптики, электрофизики и электротехники, теплофизики. Это существенно осложняет проблему и требует проведения ее углубленного изучения, постановки, и решения ряда задач, к которым относятся:

- Определение основных механизмов электроструктурного эффекта, устранение недостатка и фрагментарности данных о физике и механике явления, поиск рационального объяснения его

особенностей в различных условиях, выделение и оценка роли наиболее влиятельных факторов.

- Выяснение закономерностей изменения структуры ЭРЖ в различных условиях деформирования, получение достаточно простого, но адекватного механическому поведению, физически ясного реологического закона (уравнения состояния), устанавливающего связь между сдвиговыми характеристиками и параметрами электрического воздействия.

- Определение характеристик процесса переноса импульса в ЭРЖ под действием электрических полей, выяснение связи гидромеханических параметров и реологических свойств электроструктурирующихся жидкостей.

- Практическая реализация преимуществ электрореологического эффекта не только в традиционных технологиях, ограниченных использованием изменения электровязкости, но и в других приложениях.

Таким образом, рассматривается проблема, постановка которой, обусловлена требованиями развития современных технологий, а научная актуальность связана с необходимостью ясного понимания поляризационного и деформационного механизмов явления, определения практичных реологических моделей, реально отражающих гидромеханическое поведение ЭРЖ и разработки теоретических основ решения задач механики жидкости с нелинейными свойствами. Прикладная актуальность обусловлена экономичностью практического использования маломощных электрических сигналов в сочетании с управляемыми гидравлическими свойствами рабочих жидкостей для создания автоматизированных устройств и принципиально новых технологий.

Цель и задачи исследования. Целью исследований, проведенных в работе, является научное обоснование механизма электрореологического эффекта и основ технологии применения ЭР-жидкостей в гидравлике. Основные усилия в связи с этим были направлены на решение следующих задач:

1. Экспериментальное изучение и анализ закономерностей процесса структурообразования при учете состава ЭРЖ, электрофизических свойств твердой и жидкой фаз, влажности частиц, температуры, примесей. Определение характеристик сдвигового и электрического воздействий для построения физико-математической модели структурообразования в электрическом поле и определения типа силовых взаимодействий единичных элементов структуры.

2. Теоретико-экспериментальное исследование особенностей

проявления ЭРЭ в различных гидромеханических условиях. Теоретический анализ полученных данных, их физико-математическое описание на уровне модельных представлений.

3. Решение некоторых актуальных гидромеханических задач (численное и эксперимент), в частности, применительно к моделированию напорного течения в соосно-цилиндрическом канале-конденсаторе и его экспериментальное подтверждение.

4. Разработка новых гидравлических устройств и других технологических применений ЭРЭ.

Научная новизна полученных результатов. Большинство результатов диссертации новы, некоторые получены впервые в мировых исследованиях:

- обнаружены упруго-вязкие свойства ЭРЖ в электрических полях;
- выявлено и изучено свойство ползучести ЭРЖ;
- впервые установлено влияния электрического поля на акустические характеристики ЭРЖ;
- физически обоснованы оптимальные модели нелинейно-вязко-пластического поведения (структурно-реологические типы) ЭРЖ в зависимости от рецептуры и интенсивностей электрического и механического (сдвигового) воздействий;
- выполнен расчет и экспериментальное определение характеристик напорного течения нелинейно вязкопластичной среды с электрозависимыми параметрами и установлена их параметрическая связь с напряженностью электрического поля в соосно-цилиндрическом канале-конденсаторе;
- предложен поляризационный механизм перестройки внутренней структуры и обоснованы закономерности его влияния на гидромеханику ЭРЖ;
- на уровне изобретений разработаны принципиально новые электроструктурированные жидкости повышенной эффективности, в частности, на основе оксидных волокон, а также производных целлюлозы, композиций оксидов;
- созданы новые элементы и устройства гидроавтоматики;
- разработана технология использования ЭРЖ в гидродемпфирующих устройствах и создана на их основе система активной виброизоляции прецизионного оборудования;
- разработана технология использования ЭРЖ в фиксирующих приспособлениях (захватах) в робототехнике, а также при виброиспытаниях изделий радиоэлектронной промышленности (РЭП), и обработке механолабильных и сложнопрофильных изделий.

- разработан метод оценки качества железобетонных изделий с использованием УЗ преобразователей с согласующими ЭР-прослойками.

Новизна полученных результатов подтверждена соответствующими публикациями в рецензируемых изданиях. Новизна научных и технических решений по прикладным аспектам диссертации подтверждена авторскими свидетельствами на изобретения. Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность изложенных в диссертации результатов обеспечена современными методиками и аппаратурой при проведении экспериментов, сравнительными измерениями характеристик ЭРЖ с помощью независимых методов, метрологической аттестацией используемых приборов.

Обоснованность и достоверность модели поляризационного механизма структурообразования ЭРЖ в электрических полях и моделей реологического нелинейно-вязкопластического поведения при сдвиговом и напорном течениях подтверждены совпадением результатов расчета и экспериментальных результатов.

Практическая значимость полученных результатов. Теоретические и практические результаты диссертационной работы в форме методов, устройств, приборов, рецептов и технологий, были использованы при выполнении 6 союзных и республиканских программ по решению важнейших проблем в области естественных наук, а также 5 отраслевых хозяйственных договоров и внедрены при: разработке системы активной виброзащиты с управляемым демпфированием в НПО "Орион" (г.Москва, 1989г.); создании технологии фиксации при виброиспытаниях изделий РЭП в НПО "Интеграл" (г.Минск, 1996г.), НПО "Позитрон" (г.Ленинград), механообработке изделий металлооптики НПО "Союз" (г.Казань, 1989г.), применении ЭР-демпфирующих схватов в НИИ точного машиностроения (г.Куйбышев, 1990г.), создании метода оценки качества железобетонных изделий на Минском заводе эффективных промышленных конструкций (1990г.), опытного образца гидроамортизатора для транспортных средств на Минском тракторном заводе.

Полученные результаты позволили создать высокоэффективные электроструктурированные жидкости с управляемыми свойствами для устройств и элементов гидравлики, являющиеся коммерческим продуктом, защищенным авторскими свидетельствами на изобретение.

Обнаруженное недавно явление сохранения формы конечного объема ЭРЖ и специфики его растекания по поверхности электродов могут послужить основой разработки нового применения ЭРЖ - электрогидравлической технологии отливки полимерных пленок с

наполнителем, ориентируемым электрическим полем.

Апробация диссертационной работы. Результаты работы были доложены на 22 международных конференциях, 24 всесоюзных совещаниях, семинарах, школах и конференциях, а также научных заседаниях республиканского уровня по проблемам реологии, гидромеханики и новым технологиям. Работа в целом докладывалась на заседаниях Российского реологического общества им. Г.В.Виноградова (1994г, г.Москва), Республиканского семинара по гидродинамике (1995г, г.Киев), Физико-энергетической секции Ученого Совета Института тепло-и массообмена Академии наук Беларуси (1996,г.Минск).

Публикации По теме диссертации опубликовано 123 работы, включающие 39 авторских свидетельств, 37 зарубежных публикаций, в т.ч. два обзора, опубликованных в США, 2 препринта, одну монографию.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, выводов, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 410 страниц, включающих 7 страниц таблиц и 81 страниц рисунков, 312 наименований цитируемой литературы на 28 страницах, 26 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан анализ и оценка современного состояния проблемы, показана необходимость проведения комплексных теоретико-экспериментальных и инженерных разработок.

В общей характеристике работы обоснована актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и сведения о применимости результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе, изложены известные факты и сведения о состоянии проблемы гидромеханики электроструктурированных жидкостей. Рассмотрены известные экспериментальные данные о специфике структуры коллоидной системы в зависимости от типа дисперсных жидкостей и материала их компонент. Обсуждаются общие принципы и подходы научного анализа наиболее важных особенностей гидромеханического поведения ЭРЖ при электрическом воздействии. ЭРЖ отнесены к особому классу коллоидных жидкостей, реологическая специфика которых связана с динамикой и кинетикой структурных превращений в системе.

Выделены определяющие типы взаимодействий между элементами структуры ЭРЖ под действием сил различной природы: молекулярных сил притяжения Лондона -Вандер-Ваальса, электростатических отталкивания, давления сольватных оболочек, термодинамических типа броуновского движения, гравитационных, капиллярных, поляризационных и деформационных (сдвиговых) сил.

Определено, что основной вклад в формирование структуры и реологическое поведение ЭРЖ вносят поляризация и вязкое сопротивление сдвиговому воздействию.

На основе этого подхода с учетом представлений об ЭРЖ, как о квазисплошной несжимаемой среде, сформулирована определяющая система уравнений гидродинамики электроструктурированных жидкостей. Математическое описание включает уравнения электродинамики Максвелла, уравнение сохранения числа заряда, обобщенный закон Ома, уравнение движения, уравнение неразрывности и уравнение реологического состояния в общем виде. Решение такой системы уравнений требует определения выражений для сил электрической природы (пондеромоторных) и вида уравнения состояния.

Рассмотрены известные решения уравнения движения ЭРЖ с учетом сил диэлектрической поляризации твердой фазы на основе микроструктурных подходов, а также феноменологических зависимостей между силовыми и сдвиговыми характеристиками (модель Шведова-Бингама). Показана ограниченность известных реологических моделей ЭРЖ и неадекватность расчетных результатов экспериментальным данным. Определено, что известные закономерности гидромеханического поведения ЭРЖ в электрических полях могут быть обусловлены структурным фактором и должны учитываться нелинейностью зависимостей фундаментальных механических характеристик - вязкости, пластичности, упругости, прочности от параметров сдвига, а также их зависимостью от интенсивности электрического воздействия. В этом случае задача гидромеханики электроструктурированных жидкостей сводится к решению уравнения движения сложной реологической жидкости с параметрической зависимостью от электрического поля и требует проведения детальных реологических экспериментов. Во второй главе дан обзор известных рецептов ЭРЖ, проведена их систематизация и выявлены основные требования к составу компонент, обеспечивающему максимальную электроструктурную чувствительность. Рассмотрены известные способы оценки ЭР-активности ЭРЖ, выбраны определяющие зависимости и методика их получения с помощью

реодинамических измерений в ротационных вискозиметрах соосно-цилиндрического типа.

Изложены результаты экспериментального исследования прироста в электрическом поле эффективной вязкости ЭРЖ при фиксированных сдвиговых воздействиях с использованием компонент различного физико-химического состава. Исследованы сегнетозлектрики, оксиды, в том числе природные (диатомит, алкосиликат, каолин, цеолит), полимеры-производные целлюлозы, а также волокнистые наполнители. Использовались дисперсионные среды: минеральные масла, полиметилсилоксановые жидкости, полимерные растворы и другие диэлектрики, отвечающие условиям электрической прочности материала и необходимости получения достаточно устойчивых к седиментации суспензий. Как оказалось, частицы сегнетозлектриков не обладали ожидаемой в соответствии с классическими поляризационными представлениями способностью к образованию прочных структур в электрических полях. Максимальный эффект был получен при использовании частиц наполнителя с полупроводниковыми свойствами, при сочетании высокой поляризуемости твердой фазы и наличии связанных поверхностных зарядов, обладающих достаточной подвижностью в пределах двойного электрического слоя (ДЭС). Было установлено, что требованиям высокой активности, податливости механической обработке, доступности, дешевизне, нетоксичности и технологичности применения в гидравлических устройствах отвечают ЭРЖ на основе модификации кремнезема - диатомита и трансформаторного масла с использованием активирующей добавки - воды и поверхностно-активного вещества - олеиновой кислоты. На данную рецептуру ЭРЖ были разработаны ТУ и она была выбрана для дальнейших исследований.

Полученные результаты по оптимизации состава ЭРЖ были положены в основу разработки новых рецептур повышенной эффективности, защищенных авторскими свидетельствами.

Третья глава посвящена экспериментальному определению роли составляющих поляризации в формировании прочной структуры ЭРЖ и ее реологического отклика на электрическое воздействие.

Модификация структурных свойств наполнителя одной химической природы на примере целлюлозы проявила связь механизма ЭРЭ с изменением заряда поверхности частиц, который определялся не только поляризационными свойствами частиц, но и величиной адсорбционного заряда. Данные электрофизических измерений выявили значение подвижности и величины поверхностного заряда. Показано,

что в переменном поле в зависимости от его частоты заряды по-разному мигрируют по поверхности частиц и в разной степени способствуют образованию на частицах диполей с большим концевым зарядом.

Проведенные оценки электрореологической активности ЭРЖ и результатов диэлектрических измерений выявили определяющую роль двух составляющих поляризационного процесса и позволили разработать физико-математическую модель поляризации с учетом адсорбционной составляющей за счет накопления свободных зарядов на поверхности частиц при протекании тока утечки. Структура ЭРЖ в электрическом поле моделируется в этом случае в виде динамичной решетки элементарных конденсаторов (частица с активатором - дисперсионная среда- частица с активатором). На основании микроструктурной модели ЭРЖ была получена экспоненциальная зависимость силы натяжения мостика от скорости сдвига и напряженности электрического поля и рассчитан предел его прочности. Четвертая глава посвящена исследованию структурно-механических характеристик ЭРЖ и экспериментальному обоснованию реологического уравнения состояния.

Для изучения процесса образования структуры и ее динамики в электрических полях использовались спеклоинтерферометрический метод и фотосъемка под микроскопом. Первая реакция частиц соответствует 10^{-4} с. Она проявляется в трансформации броуновского движения в виде "схватывания, замерзания" картины хаотического движения частиц. Далее наблюдается их перемещение, объединение в отдельные агрегаты, мостики и в сплошной каркас, пронизывающий межэлектродный зазор. Сдвиг вызывает разрыв каркаса на отдельные элементы, прежде всего, в области максимальных скоростей и перенос их потоком. Во время движения, вновь сталкиваясь, частицы образуют новые агрегаты, присоединяющиеся к обрывкам мостиков ниже по течению, что ведет к достройке последних до контакта с противоположным электродом. Суммарное силовое взаимодействие в этих динамичных структурах и определяет степень их сопротивления разрушающим сдвиговым силам.

Экспериментальная оценка сил взаимодействия проведена в различных условиях деформации. Прежде всего было рассмотрено простое кузтовское течение между двумя поверхностями при сдвиге одной из стенок канала-конденсатора. Измерение проводилось в зазоре ротационного вискозиметра при вращении ротора с постоянной скоростью сдвига. Компенсационный момент служил мерой изменения

свойств среды и по его показаниям рассчитывалась эффективная вязкость и ее изменение при электрическом воздействии. Видно, что в первом случае кривые течения (Рис. I) линейны и проходят через начало координат, во втором — отсекают заметный отрезок на оси напряжений сдвига и становятся нелинейными при малых и умеренных скоростях деформирования. Реограммы распадаются на два типа. Для малоконцентрированных суспензий кривые течения монотонно нарастают. У высококонцентрированных суспензий появляется "седло" и темп нарастания разности напряжений сдвига снижается. Кривые течения постепенно приобретают постоянный наклон, т.е. при больших $\dot{\gamma}$ течение происходит с постоянной эффективной вязкостью. Эта ситуация соответствует полному разрушению структур, когда имеет значение лишь собственная поляризация частиц. Аналогичные, но более слабые зависимости были получены в полях импульсного типа и при переменных синусоидальных электрических воздействиях. Установлено, что с ростом частоты поля ЭРЭ снижается, что соответствует принятой модели поляризации, когда поверхностные заряды за время одного цикла не успевают перемещаться к полюсам частицы.

Реологические измерения обнаружили тиксотропию — способность ЭРЖ проявлять механическую память о сдвиговом воздействии. В электрическом поле при увеличении или снижении его интенсивности ЭРЖ также "помнит" структурообразующее действие поля, но значения напряжения сдвига оказываются выше при обратном ходе, в отличие от предыдущей зависимости. Эти опыты указывают на необходимость учитывать фактор времени при работе со структурированными жидкостями, и сопоставлять их реакцию на электрический импульс с периодом механической нагрузки.

По измеренным зависимостям напряжения сдвига от скорости деформирования вычислялась эффективная вязкость, зависимость которой от различных факторов представлена на рис. 2. Закономерности ее изменения от напряженности электрического поля и скорости сдвига аналогичны изменению удельной проводимости, что доказывает обоснованность учета адсорбционной составляющей в модели поляризационного механизма ЭРЭ. Снижение эффективной вязкости при увеличении скорости сдвига свидетельствует о псевдопластичном характере течения, т.е. решающей роли структурного фактора в механическом поведении ЭРЖ.

Электрическое поле создает предел текучести — начальное напряжения сдвига, при превышении которого создается течение в

канале. Конечное значение τ_0 свидетельствует о пластическом характере механического поведения ЭРЖ в области малых скоростей сдвига. Этот диапазон и особенности перехода ЭРЖ к вязко-пластическому течению исследовались с помощью вискозиметра постоянного напряжения сдвига по изменению деформации во времени. Результаты показали (Рис.3), что при $\tau < 80\% \tau_0$ проявляется ползучесть, включающая участки мгновенной упругости, вязко-упругости и вязкого течения. Как оказалось, отношение мгновенного упругого восстановления к общей деформации уменьшается с увеличением нагрузки и ослаблении интенсивности электрического поля. При приближении удельного усилия сдвига к τ_0 мгновенное упругое восстановление исчезает и механическое поведение системы становится пластическим. ЭРЖ начинает течь в поле при скоростях сдвига меньших 10^{-2} с^{-1} . Значение предельного напряжения сдвига зависит не только от диапазона скоростей деформаций, но и от времени предварительного электрического воздействия, что связано с разной степенью упорядочения структурного каркаса. При отключении электрического поля в момент приложения нагрузки течение развивается не сразу, а лишь после определенного времени, характеризующего способность ЭРЖ сохранять механическую прочность. Определена зависимость долговечности, т.е. отрезка времени между моментами начала приложения нагрузки к материалу до его разрушения от ее величины. Это позволило вычислить соответствующие значения энергии активации вязко-пластического течения, которые оказались порядка 80-100 кдж/моль, что соответствует значениям межмолекулярных связей рассматриваемой коллоидной системы.

Область обратимых деформаций была исследована с помощью механического спектрометра, модифицированного для измерения в электрических полях. Были измерены модули упругости и потерь при синусоидальных возмущениях в диапазоне частот от 0,01 до 400 гц. Электрическое поле создает и увеличивает упругость ЭРЖ (на два порядка для высоконаполненных систем - Рис.4), в которых наблюдается сформированный структурный каркас. Значения модулей упругости и потерь не изменяются с частотой в зоне вязко-упругого поведения, но сильно зависят от амплитуды скорости деформации. По этой зависимости найдена верхняя граница зоны линейного деформирования, ниже которой значения модуля упругости не изменяются. С увеличением воздействия поля эта зона расширяется на область больших деформаций. Рассчитанная по комплексному модулю сдвига динамическая вязкость ЭРЖ была сопоставлена с вязкостью

стационарного течения. Ее значения выше для всех режимов деформирования и интенсивностей электрического воздействия.

Наряду с электрическим полем и типом сдвиговой деформации определяющим фактором механического поведения ЭРЖ является их состав. Установленные выше особенности проявляются в различной степени для ЭРЖ с разной концентрацией твердой фазы. Нами выделены три типа структурно-реологического поведения ЭРЖ - с низким (I-5%, вес), средним (5-20%) и высоким (20-60%) ее содержанием.

Таким образом, гидромеханические особенности поведения электроструктурированных жидкостей определяются комбинацией упругости, вязкости и пластичности, проявляющихся в различной степени в зависимости от ЭРЖ, сдвиговых и электрических условий.

С помощью оценочных методов с выбранной предельной точностью 10% было установлено, что наиболее адекватно течение ЭРЖ описывается реологическими моделями следующего типа, универсальными для всего диапазона параметров :

$$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\mu_p \dot{\gamma})^{1/m} \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0(E) + \mu_0(E) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \dot{\gamma} + \frac{E^2}{E_0^2} K(E, C) \dot{\gamma}^2 \right\} \quad (2)$$

Наилучшее приближение дает модель (2). Однако, она сложна и требует постановки специальных опытов для определения структурного коэффициента $K(E, C)$. Поэтому для расчета гидромеханических характеристик ЭРЖ малой и средней концентрации была использована четырехпараметрическая модель степенного типа (1), дающая точность не менее 5%. Ее коэффициенты легко определяются из реограмм в виде зависимостей от напряженности электрического поля:

$$\tau^{1/n} = b + b' E^2, \quad m = n = c + c' E \quad \mu_p^{1/m} = a + a' E + a'' E^2$$

Пятая глава посвящена теоретико-экспериментальному изучению напорного течения ЭРЖ в канале-конденсаторе соосноцилиндрического типа на основе выбранной модели реологического состояния (1). Задача течения электроструктурированных жидкостей сводится к расчету течения нелинейно-вязкопластичной среды с коэффициентами, зависящими от напряженности поля. Было получено решение совместной системы уравнений конвективного переноса импульса (количества движения) и

реологического уравнения (I) состояния для зон вязкого и пластического течения в канале (Рис.5) при граничных условиях прилипания на стенках канала $u = 0$ ($r = R_1, R_2$). Радиальная эпюра напряжений сдвига в поперечном сечении канала имеет вид:

$$\tau = - \frac{I}{2} \frac{R_2 \Delta P}{L} \left(\frac{r}{R_2} - \frac{\bar{\lambda}^2 R_2}{r} \right) \quad (3)$$

Введение безразмерных переменных:

$$\rho = \frac{r}{R_2}, \quad \varphi = \frac{2\mu P L}{R_2^2 \Delta P} u, \quad \beta_0 = \frac{2\tau_0 L}{R_2 \Delta P}, \quad \alpha = \frac{R_1}{R_2}$$

и непосредственное интегрирование (3) дает выражения для скоростей течения в I и II зонах в виде выражений:

$$\varphi_1 = \bar{\lambda}^2 \ln \rho / \kappa - \frac{1}{2} (\rho^2 - \alpha^2) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p C_p \beta_0^{p/n} \left[f_1(\rho) - f_1(\alpha) \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_1(\rho) &= \int \left(\frac{\bar{\lambda}^2}{\rho} - \rho \right) \frac{1-p/n}{d\rho} \\ \varphi_2 &= \bar{\lambda}^{-2} \ln \rho + (I - \rho^2) + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p C_p \beta_0^{p/n} \left[f_2(I) - f_2(\rho) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_2(\rho) = \int \left(\rho - \frac{\bar{\lambda}^{-2}}{\rho} \right) \frac{1-p/n}{d\rho}$$

Для определения границ квазитвердого ядра ρ_1 и ρ_2 и постоянной интегрирования λ использованы: 1) кинематическое условие равенства скоростей на границах квазитвердого ядра течения ; 2) динамическое условие равенства сил, действующих на ядро; 3) условие равенства напряжения сдвига на границах ядра пределу текучести.

Полученное трансцендентное уравнение решалось численно для определения зависимости влияния реологических параметров n , $\tau_0(\beta_0)$ на скорость движения квазитвердого ядра и безразмерный расход g^* . Как иллюстрируют рис.6, с увеличением пластичности эти величины прогрессивно уменьшались, причем тем сильнее, чем больше параметр нелинейности. Профиль скорости, построенный для неизменных объемных расходов с увеличением реологических параметров становился менее выпуклым и более заполненным, ширина квазитвердого ядра увеличивалась и градиент скорости в пристеночной области (Рис.7) возрастал. Однозначные зависимости

перепада давления от напряженности поля позволяют установить связь относительного объемного расхода с перепадом давления для различных значений E . Она описывается формулой :

$$Q_0/Q = I \frac{a' + a''E^2}{c' + c''\Delta P}, \text{ где } (6)$$

a' , a'' , c' , c'' — коэффициенты, определяемые для каждого типа ЭРЖ.

Результаты теоретического расчета были подтверждены экспериментально путем непосредственных измерений объемного расхода и перепада давления стабилизированного течения ЭРЖ в соосноцилиндрическом канале-конденсаторе.

Результаты опытов показали, что без поля зависимость расход-напор линейна. Электрическое поле создавало степенную нелинейность типа $Q^n = f(P)$ до достижения зоны, в которой напорные сдвиговые усилия значительно превышали электрическое влияние. Измерения были проведены для различных составов ЭРЖ при варьировании температур, напоров и проходных сечений канала.

Согласие между теоретическими и экспериментальными результатами в пределах максимальных отклонений составило 11 %, что подтверждает правомерность принятого в расчете реограммного подхода. В шестой главе изложены результаты прикладных исследований и практического применения электрореологического эффекта — устройств, методов и рецептур ЭРЖ, составляющих в совокупности предмет ЭР-технологии.

Типы гидромеханического поведения ЭРЖ, выделенные в главе III, позволили распределить все разработанные технические решения по четырем группам:

1. Устройства для регулирования характеристик процессов переноса при течении жидкости через канал-конденсатор;
2. Демпферы вязкого трения (пульсирующее течение ЭРЖ).
3. Муфты сцепления, фрикционные и фиксирующие приспособления.
4. Нетрадиционные устройства и технологии применения ЭРЖ.

Основными элементами первой группы гидравлических устройств являются электрореологические клапаны, создающие при воздействии поля на ЭРЖ, протекающую через них, управляемое сопротивление потоку. В отличие от известных моделей соосноцилиндрического и дискового типа была разработана новая модель винтового клапана, основными элементами которого являются ленточные пружины-электроды, собранные в обойму с зазором, через который протекает ЭРЖ. Сравнение эффективности соосноцилиндрического и винтового клапанов, показало, что достигаемый полезный перепад

давления при равных габаритах на последнем оказывается в пять раз выше. Оценки бысродействия таких клапанов позволили установить, что их отклик составляет 0,01с.

Полученная информация о свойствах и особенностях течения ЭРЖ в клапанах-конденсаторах позволила разработать ряд гидроустройств как на основе традиционных конструкций с заменой некоторых элементов, так и принципиально новых. Например, насос для перекачки диэлектрических жидкостей (Рис.8) содержит два клапана 3,4. Один из них, всасывающий, 3, имеет возможность совершать возвратно-поступательное движение под воздействием привода I, а другой - напорный 4, жестко закреплен в цилиндре и поддерживает давление в системе нагнетания. При смещении всасывающего клапана в сторону напорного на всасывающий подается необходимое электрическое напряжение, обеспечивающее максимальное увеличение эффективной вязкости ЭРЖ вплоть до запираания клапана. Исполняя функции поршня, клапан выталкивает жидкость, находящуюся в межклапанном объеме, через напорный клапан в гидросистему. При достижении всасывающим клапаном "мертвой" точки электрическое напряжение подается на напорный клапан, что предотвращает падение давления в системе, а с всасывающего клапана - снимается. При обратном ходе штока через всасывающий клапан жидкость заполняет межклапанный объем. Повторение циклов создает перекачивание суспензии.

На том же принципе превращения клапана в поршень основаны рациональные конструкции гидровибраторов, одна из схем которых приведена на рис.9. Электроореологическая жидкость под действием насосов I постоянно прокачивается через цилиндр 2 и электроореологические клапаны 4. При подаче электрического импульса на электроды, клапан запирается. Во входной полости цилиндра 2 происходит гидравлический удар, в результате чего клапаны 4 и скрепленный с ними шток 3 перемещаются. При поочередной подаче электрических импульсов на электроореологические клапаны 4 происходит возвратно-поступательное перемещение штока 3 вибратора, частота которого соответствует частоте электрических импульсов.

На основе ЭРЖ были разработаны гасители силовых воздействий, противоударные и тормозные устройства. Эффективность применения ЭР амортизатора была положительно оценена в системе подвески кресла водителя трактора "Беларусь", в частности по коэффициенту $k = 2m/t \cdot \ln A_I / A_{II}$. Результаты представлены в таблице.

Характеристики ЭР-амортизатора вязкого трения

Подвеска без амортизатора				
A_1	A_1'	Δt	K	Непряжен. эл. поля
мм	мм	с	Н/с	Е, кВ/мм
2I	I7	0,4	62,92	-
Подвеска с серийным амортизатором АС-20				
2I	II	0,4	2I6,I7	-
Подвеска с ЭРамортизатором				
20	6	0,4	402	0
I9	5	0,4	445,5	I,0
I7	2	0,4	7I6,9	I,5
I8	I,5	0,4	830,8	2,0
I5	I,0	0,4	I309,8	3,0

Исследования резонансных колебаний подвески подтвердили способность ЭРА предотвращать увеличение размаха колебаний. Подача на амортизаторы управляющего электрического воздействия приводила к полному исключению пробоев подвески, когда подрессоренная часть колебалась в области люфтов. Результаты опытов показали, что при одинаковых значениях ускорения на вибростенде с подачей электрического воздействия снижалось значение передаточного коэффициента по ускорению. Так, при $E = 2$ кВ/мм ускорение сидения изменялось на 30 % по сравнению со своим значением при $E = 0$. Эти результаты позволяют рекомендовать использование ЭР амортизаторов для установки на машинах, используемых на местности с неглубоким рельефом, например, в асфальтоукладчиках, а их основные узлы - ЭР-клапаны для использования в качестве управляемых элементов гидропневматических подвесок тракторных агрегатов любого типа.

Весьма эффективным оказалось использование демпфирующих устройств с ЭР-клапанами в демпферах вязкого трения систем виброзащиты прецизионного оборудования (электронные микроскопы, лазерные стенды, системы наведения т.п.). С этой целью была создана и внедрена система активной виброзащиты, содержащая (Рис.10) объект виброзащиты на пассивных вибраторах 2, 3, установленный на фундаменте 4, чувствительный элемент 5, закрепленный на объекте 1 и электрически связанный с автоматически регулируемым источником высокого напряжения 6, и исполнительное устройство 7, представляющее собой корпус 8 с закрепленными внутри радиально электродами 9 и шток 10 с радиальными внешними

электродами II, помещенными в корпус в 8, который заполнен ЭРЖ 12.

При возникновении внешнего возмущения F чувствительный элемент, закрепленный на объекте, подает сигнал автоматически регулируемому источнику высокого напряжения. При работе, в непрерывном режиме, последний формирует выходной сигнал, пропорциональный возмущению по любому закону изменения последнего, и подает его на исполнительное устройство (ЭР-демпфер вязкого трения) 7. Исполнительное устройство отрабатывает в режиме непрерывного слежения перемещенное демпфирующее усилие, снижающее амплитуду вертикальных собственных колебаний системы.

Данная система допускает глубокую регулировку силы демпфирования и кратковременное увеличение жесткости системы одновременно в нескольких направлениях при изменении внешних воздействий.

Зависимость гидравлических характеристик от внешнего электрического воздействия, изменение профиля скорости в канале, создающее увеличение скорости в пристеночной зоне, позволили рассмотреть возможность использования ЭРЖ в качестве эффективных теплообменных сред при конвективном теплосъеме с поверхностей объектов, имеющих высокий потенциал.

Результаты теоретического расчета показали, что максимальное изменение температуры жидкости при конвективном теплообмене происходило в зоне тепловых пограничных слоев. Их толщина зависит от продольной координаты, теплофизических свойств среды и особенно сильно - от реологических свойств ЭРЖ, создаваемых полем. Экспериментально на модели теплообменника труба-в трубе была установлена зависимость относительного коэффициента теплообмена α/α_0 от напряженности электрического поля, свидетельствующая о его интенсификации:

$$\alpha/\alpha_0 = 1 + K_1 E^{\bar{m}}, \quad \text{где } K_1 = 0,002-0,005, \quad \bar{m} = 1-1,7$$

Использование высоких значений сил сцепления, возникающих в структурных элементах ЭРЖ под действием поля, позволяет создать эффективные фрикционные и фиксирующие устройства, применение которых перспективно в механообработке, робототехнике при механических испытаниях изделий, а также в муфтах сцепления. На рис. II представлено устройство ЭР- муфты. Она содержит полумуфту I с пакетом дисков 2, 3, полумуфту 4 с пакетом дисков 5, 6, 7, заполняющую пространство между дисками ЭРЖ - 8, высоковольтный источник напряжения 9. При включении электрического поля ЭРЖ

переходит в квазитвердое состояние, что приводит к соединению полумуфт I и 4. Изменение напряжения позволяет как жестко фиксировать полумуфты, так и допускать их проскальзывание друг относительно друга, обеспечивая тем самым различные передаточные отношения при использовании нескольких подобных конструкций. Такие устройства могут применяться для замены традиционных вязкостных муфт; для регулировки натяжения при навивочных операциях; для работы в качестве регулируемых демфиров крутильных колебаний. ЭР-крепежные устройства были испытаны с целью использования при:

- механообработке поверхностей плоских монолитных деталей, нежестких конструкций, механолабильных изделий, деталей сложной геометрической формы;
- испытании изделий, на вибро- и ударопрочность, в частности, для радиоэлектронной промышленности;
- операциях схвата, переноса и установки в позицию изделий с помощью робототехнических устройств.

Было показано, что при операциях тонкого точения металлооптических изделий электрическое поле величиной 1 кВ способно удерживать детали при вращении планшайбы карусельного станка без их вертикального отрыва от ее поверхности при скорости до 2000 об/мин, тангенциального сдвига - до 1200 об/мин.

Возможность повышения точности обработки торцов тонкостенных конструкций, представляющих собой оболочку вращения из алюминиевого сплава, высотой - 1540 мм, диаметром - 2050 мм, толщиной полотна - 4 мм, была показана при ее обработке на универсальном фрезерном станке 678М.

Конструкция (Рис.12) I закреплялась на планшайбе 2 станка планками 3. Электрореологические фиксирующие узлы 4 с нанесенной на опорную поверхность 60%-й диатомитовой ЭР-жидкостью подводились к оболочке конструкции I и закреплялись зажимами стоек 5, смонтированными на тумбах 6. Опыты показали, что амплитуда вибрации при включении электрического поля (1,0 кВ) уменьшалась в 4 - 10 раз, что позволило достигнуть повышения точности обработки торцов детали в 5-10 раз по сравнению с получаемой в настоящее время с помощью традиционных методов.

Задача создания универсального устройства крепления возникает в связи с обработкой податливых и сложнопрофильных, фасонных изделий, таких, например, как лопатки компрессора. Разработанная с использованием адаптивного электрореологического фиксирующего

элемента система увеличения жесткости лопаток позволила снизить прогибы лопатки до 30%, что дало возможность значительно уменьшить динамическую составляющую погрешности обработки.

В радиоэлектронной промышленности в массовых количествах проверяются на вибро-и ударопрочность изделия и радиодетали различной формы, массы. Разработанная технология ЭР-крепления позволила при условии сохранения оперативности и экономичности способа крепления обеспечить 80 - 100% передачу энергии механических воздействий от стола виброударного оборудования к испытываемому изделию в диапазоне ускорений до 40g.

Помимо рассмотренных выше вариантов крепежной оснастки использование ЭР-технологии возможно в узлах манипуляторов и схватов робототехнических устройств.

Опытные образцы схватов прошли заводские испытания в режиме технологического процесса штамповки в системе робота РФ-202М и пресса КД2328. При испытаниях выполнялись операции извлечения детали из загрузочного устройства, подачи ее в рабочую зону пресса и установки в штамп, извлечения после штамповки и транспортировка в приемную тару. Было успешно проведено 85 циклов в автоматическом режиме как с магнитными, так и немагнитными деталями.

Структурные изменения в ЭРЖ под действием электрического поля приводят к изменению не только ее механических, но и других физических свойств. Проведенные измерения показали увеличение коэффициента теплопроводности в электрическом поле, и послужили основой для разработки дифференциального способа определения теплопроводности сред. Кроме того, была создана конструкция сейсмоприемника, в котором для компенсации температурных нестабильностей, изменяющих коэффициент демпфирования, используется однозначная зависимость гидравлических и теплофизических свойств ЭРЖ от управляющего электрического сигнала, что позволяет производить корректировку показаний прибора в автоматическом режиме.

Исследование акустических свойств ЭРЖ в электрических полях было проведено с целью определения целесообразности их использования в управляемых акустических устройствах с перенастраиваемыми параметрами - гидролокаторов, линий задержки, фильтров, линз, а также согласующих прослоек, например, для дефектоскопов. Было экспериментально установлено различие в степени изменения коэффициента поглощения акустических колебаний в исследованных ЭРС

в зависимости от направления их распространения по отношению к вектору напряженности электрического поля. При электрическом воздействии обнаружено увеличение скорости ультразвука в слое ЭРЖ в среднем на 0,1 – 0,7 %.

Нами было впервые экспериментально исследовано влияние электрического поля на особенности растекания конечного объема ЭРЖ на плоской поверхности. Визуальные наблюдения и анализ фотоматериалов показали, что подача электрического поля заметно изменяет картину растекания капли – отмечается относительное уменьшение размеров ее пятна – параметров r , h и угла смачивания θ , соответствующих фиксированным отрезкам времени.

Поля высокой напряженности ($U > 1,5 \text{ кВ}$) создают ситуацию, при которой капля удерживается на поверхности без растекания длительное время t_n . При этом меняется угол смачивания – в этой стадии он меньше 90° , что свидетельствует об изменении коэффициента поверхностного натяжения.

Кинетика изменения радиуса $\Delta R = R - R_0$ и высоты $\Delta h = h - h_0$, где R_0 и h_0 начальные размеры капли при воздействии на нее стационарного внешнего поля в течение времени $t \leq t_B$, наиболее адекватно описываются степенными моделями вида: $\Delta h = A \cdot t^{-d}$, $\Delta R = B \cdot t^K$. Изменение коэффициентов A , B , d , K с напряжением U соответствует линейному закону:

$$A = a + b \cdot U, \quad B = b_1 + b_2 \cdot U, \quad d = d_1 + d_2 \cdot U, \quad K = K_1 + K_2 \cdot U$$

Данная технология управления растеканием электроструктурированной жидкости перспективна для управления процессом отливки полимерных пленок, содержащих электрочувствительный наполнитель, например с целью создания покрытий с требуемыми оптическими или механическими свойствами.

О С Н О В Н Ы Е В Ы В О Д Ы

В результате выполненного исследования решена актуальная научно-техническая проблема разработки научных основ и создания технологии использования нового класса гидравлических электроструктурированных жидкостей и устройств на их основе.

Полученные научные и практические результаты можно сформулировать в виде следующих положений:

I. На уровне современного физического эксперимента дано обоснование физической природы ЭРЖ как проявления реологической специфики поляризационных микроструктурных взаимодействий в ЭР-жидкости.

2. Выполнен полный комплекс измерений текучести ЭРЖ в широком диапазоне изменения электрических напряжений и скоростей сдвига. Получены фундаментальные реологические характеристики и их зависимость от напряженности и частоты поля, концентрации твердой фазы, добавок активаторов, внешних температурных и механических воздействий. Показано, что гидромеханическое поведение ЭР-жидкостей определяется совокупным проявлением нелинейно вязких, пластичных и упругих свойств текучей системы. Для описания течения ЭР-жидкости предложено четырехпараметрическое реологическое уравнение состояния с коэффициентами, зависящими от интенсивности электрического поля.

3. В терминах физической гидродинамики сформулирована и численно решена задача течения нелинейно вязкопластичной жидкости в горизонтальном соосно-цилиндрическом канале. Определены поля скоростей и зависимости гидродинамических характеристик от типа и интенсивности электрического воздействия. Сопоставление расчета с результатами собственных опытов показали их хорошее согласие. Получена базовая для многих приложений гидродинамики (клапаны) зависимость расход - напор от интенсивности приложенного поля.

4. На основе теоретических обоснований о природы электрореологического эффекта и обнаруженных закономерностей его проявления при сдвиговых и напорных течениях разработаны новые рецептуры ЭР-жидкостей повышенной эффективности.

5. Полученные данные и рекомендации положены в основу разработки многих применений ЭР-жидкостей - в гидравлике, гидроавтоматике, теплотехнике, технологии вязкого демпфирования, фиксации изделий при механообработке, виброиспытаниях и в робототехнике, а также в акустических устройствах и др. Показано, что разработанные методы и технические решения весьма эффективны и открывают новые возможности существенного повышения качества и улучшения характеристик гидравлического оборудования, в частности, систем вязкого демпфирования и устройств гидроавтоматики.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Коробко Е.В. Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования. Минск.: АНК ИТМО АНБ.- 1996, - 163 с.
2. Korobko E.V. Dielectric Measurements of Activated ERF. // Proceedings of the Second Int.Conf.on Intelligent

Materials./Ed.:C.A.Rogers,Williamsburg.VG USA.5-7 June 1994.
- P.751-759.

3. Шульман З.П., Коробко Е.В. Исследование электрореологического эффекта при течении диэлектрических суспензий в горизонтальном соосно-цилиндрическом конденсаторе.// ИФЖ. - 1974. - Т 26. -№5.
4. Korobko E.V.The State of the Art of Electrorheology Studies in the Former USSR. // Orevuer in Electrorheological Fluids (ERF) / Ed:E.Collinds. - 1993.- P.11-40.
5. Korobko E.V. Electrorheological disperse media based on fibrouse filler.// Proceedings SPIE Smart Structures and Intelligent Systems./ Ed.J.Chopra. San-Diego: - 1995. - V. 2443. - P.806-815.
6. Korobko E.V. Boundary Effeacts of ERF Spreading in Electric Field.// Proceedings 5 th Int.Conf.on ERF,MRF and Associated Technology./ Ed.: W.Bullough, Sheffield.- 1995. - P. 217-225.
7. Korobko E.V. Some Aspects of Electrorheology. // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. - 1992. - V.3. - N 2. - P.268- 295.
8. Korobko E.V. The Main Properties of ERF's and their Application.//Proceedings of the Conference on Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and their Applications./ Ed.C.A.Rogers,R.C. Rogers,Blacusburg, Virginia, 27-29 Aug. 1992. - P.I- I7.
9. Шульман З.П., Коробко Е.В.Интенсификация конвективного теплообмена слабопроводящих суспензий с помощью электрических полей.// Электронная обработка материалов. - Кишинев: - 1977.- N I.- С. 71-75.
- 10.Коробко Е.В., Малецуро А.Д., Красникова Н.П. Реологическое поведение и тиксотропия электрореологических суспензий в различных температурно-скоростных режимах. //Весті АН БССР. Сер. Фіз.-енерг. - 1989. - N 2. - С. 66-71.
- 11.Korobko E.V., Shulman Z.P. The Mechanism of Visco-plastic Behavior of Electrorheological Suspensions.//Proceedings of the II Intern.ConferenCe on ER-Fluids. /Ed.J.Carlson 7-9 Apr.1989 N.C.USA. - P. 3-13 .
- 12.Korobko E.V., Shulman Z.P., Yanovsky Yu.G. The mechanism of a visco-elastic behavior of electrorheological suspensions //Journal of Non -Newtonian Fluids. - 1989. - V.33. - N 1. - P. 181-190.
- 13.Коробко Е.В., Мокеев А.А. The electrorheological effect in Activated Suspensions. //Journal of Intelligent Materials and Science. - 1991. V.2. - N 1. - P. 25-37.
- 14.Коробко Е.В., Чернобай И.А. Исследование влияния внешнего электрического поля на распространение ультразвука в электрореологических суспензиях. // ИФЖ. - 1985. - Т. 58. - N 2. - С. 219-225.
- 15.Коробко Е.В., Чобот М.А., Букович И.В., Артеменков А.Н., Корниенко А.А. Особенности распространения УЗ в электрореологических суспензиях. // Весті АН БССР. Сер. Фіз.-енерг. - 1987. -N 2.- С.105-109.
- 16.Shulman Z.P., Korobko E.V. Convective Heat Transfer of Dielectric Suspensions in Coaxial Cylindrical Channels.// Heat and Mass Transfer.- 1978. - N 5. - P. 543-548.
- 17.Korobko E.V., Ragotner M.M., Gorodkin P.G., Bukovich I.V. Electrorheological Fluid as an Element in cluchs. //Journal of Intelligent Material Systems and Structures. - 1991. - V.2. - N 2. - P.215-227 .
- 18.Korobko E.V., Zavtrak S.T. Electric Field Effect on Acoustic Characteristic of ERS. // Proceedings III Int.Conf. on ERF. / Ed: R.Tao, Carbondale. 14-16 Oct. USA.- 1991. - P.300-325 .

19. Korobko E.V., Mokeev A.A., Vedernikova L.G. Structural viscosity of Electrorheological Fluids. // Journal of Non-Newtonian Fluids. - 1992. - V.42. - P.213-230.
20. Korobko E.V., Lazareva T.G., Ragotner M.M., Ermolenko J.N. Rheology of Polymer Suspensions in Electric Fields. // Int.J.Polymer Mater. EPS N8 130 Paper Pet.No IJP-7-11. - 1993.
21. Korobko E.V., Mokeev A.A., Egorov N.N. A study of ER Non-Newtonian Flow. // Proceedings of the Int. Mechanical Engineering Congress. /Ed.: D. Sigine. Chicago. - 1994. - P. 248-253.
22. Korobko E.V., Dreval V.D., Shulman Z.P., Kulichikhin V.G. Peculiar Features in the Rheological Behavior of Electrorheological Suspensions. // Rheological Acta. - 1994. - V.33. - N 2. - P.117-125.
23. Коробко Е.В., Воронович Г.К., Раготнер М.М., Яцевич А.А., Хижинский Б.П. Электрореологическое демпфирование колебательных систем при случайных вибровоздействиях. // Реокинетика и конвекция в структурирующихся композициях. - Минск: ИТМО АН БССР. - 1990. - С. 98-109.
24. Шульман З.П., Чобот М.А., Букович И.В., Коробко Е.В., Суханова Р.В. Исследование диэлектрических свойств электрореологических суспензий. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг.наук. - 1985. - N 2. - С. 96-101.
25. Виноградов Г.В., Шульман З.П., Баранчеева В.К., Яновский Ю.Г., Коробко Е.В., Букович И.В. Вязкоупругое поведение электрореологических суспензий. // ИФЖ. - 1986. - N 4. - С. 605-609.
26. Шульман З.П., Хусид Б.М., Коробко Е.В., Хижинский Б.П. Исследование характеристик ЭР-демпфера вязкого трения в системе виброизоляции точной аппаратуры. // ИФЖ. - 1987. - Т.52. - N 2. - С. 237-244.
27. Shulman Z.P., Gorodkin P.N., Korobko E. V., Gleb V.K. The electrorheological effect and its possible uses. // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanisms. - 1981. - N 8. - P.29-41.
28. Мокеев А.А., Коробко Е.В., Маркова Л.В., Хижинский Б.П., Мосеев В.В. Демпфирующее влияние электрочувствительной жидкости в системе виброизоляции точной аппаратуры. // Машиноведение. - 1988. - N 4. - С.104-108.
29. Яновский Ю.Г., Бранчеева В.В., Коробко Е.В. Особенности механического поведения электрочувствительных дисперсий различных структурно-реологических типов. // ИФЖ. - 1989. - Т.57. - N 2. - С.219-225.
30. Шульман З.П., Куличихин В.Г., Древал В.Е., Коробко Е.В. Тиксотропные свойства электрореологических суспензий при непрерывном деформировании. // ИФЖ. - 1990. - Т.59. - N 1. - С. 38-40.
31. Лазарева Т.Г., Коробко Е.В., Ермоленко И.Н., Шульман З.П. Влияние электрического поля на реологические свойства суспензии диоксида титана в растворах эфиров целлюлозы. // Коллоидный журнал. - 1990. - Т.52. - N 1. - С. 141-145.
32. Коробко Е.В., Раготнер М.М., Горолкин Р.Г., Букович И.В., Гайнутдинов Н.В., Яшин Н.А., Сафин Р.Г. Электрореологическая оснастка для фиксации деталей. // Механизация и автоматизация. - 1990. - N 4. - С.16-19.
33. Лазарева Т.Г., Коробко Е.В., Ермоленко И.Н., Раготнер М.М. Пленкообразующие электрочувствительные композиции на основе оксидов металлов. // Весці АН БССР. Сер. хим.наук. - 1990. - N 5 - С. 22-25.
34. Шульман З.П., Коробко Е.В., Пиил Д.Л., Баллоу В.А. Исследование временных особенностей реодинамики слабопроводящих суспензий в

- электрических полях.// ИФЖ. - 1993. - Т. 64. - № 2. - С. 179-185.
35. Лазарева Т.Г., Коробко Е.В., Ермоленко И.Н. Влияние электрического поля на реологические свойства суспензий на основе ряда оксидов металлов в растворах эфиров целлюлозы.// Коллоидный журнал. - 1993. - Т. 54. - № 1. - С. 90-95.
 36. Завтрак С.Т., Коробко Е.В. Поведение газовых пузырьков в жидких диэлектриках в присутствии внешнего электрического поля.// Журнал теоретической физики. - 1991. - Т. 61. - № 3. - С. 177-179.
 37. Лазарева Т., Коробко Е.В., Раготнер М.М., Алимов И.Ф. Исследование электрореологической активности диэлектрических суспензий на основе полимерного наполнителя.// Коллоидный журнал. - 1991. - Т. 53. - № 1. - С. 256-271.
 38. Шульман З.П., Хусид Б.М., Коробко Е.В. Системы виброзащиты на основе демпферов вязкого трения с электрореологической суспензией. // ДАН БССР. - 1987. - Т. 31. - № 8. - С. 717-720.
 39. Kordonsky V.I., Lazareva T.G., Korobko E.V. Electrorheological Polymer-Base suspensions. // Journal of Rheology. - 1991. - V. 35. - P. 1427-1440.
 40. Shulman Z.P., Korobko E.V., Khusid I.M., Khidginsky B.P. Damping of mechanical systems oscillations by a Non-Newtonian fluid with electric field dependent parameters: " Journal of Non-Newtonian Fluids. - 1987. - V. 25. - P. 329-346. 41. Gorodkin R.G., Korobko E.V., Bloch G.M., Gleb V.K. Applications of the Electrorheological Effect in Engineering Practice.// Fluid Mech.-Sov. Res. - 1979. - V. 8. - № 4. - P. 48-61.
 42. Шульман З.П., Хусид Б.М., Коробко Е.В., Хижинский Б.П., Мосеев В.В. Электрореологическая виброизоляция колебательных систем. (Препринт/Минск ИТМО АНБ) - 1986. - № 22. - 38 с.
 43. Миронов Э.И., Станилевич А.Н., Кордонский В.И., Коробко Е.В., Лукьянович А.В., Раготнер М.М. Исследование возможности улучшения виброзащитных свойств сильней мобильных машин на основе магнито- и электрореологических управляемых амортизаторов.// Транспортные процессы в полимерных и суспензионных жидкостях. ИТМО АН БССР. - 1986. - С. 42-49.
 44. Шульман З.П., Коробко Е.В., Горюкин Р.Г., Раготнер М.М. Электрореологические крепежные устройства. (Препринт/Минск: ИТМО АНБ). - 1991. - № 8. - 52 с.
 45. - 60. А.с. № 625073, 606001, 619218, 717417, 724220, 709329, 633793, 830126, 1660384, 1093955, 1730117, 1525570, 1551872, 1403721, 1663261, 1654312.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору З.П.Шульману за многолетнюю научно-методическую помощь в процессе выполнения данной работы и обсуждении полученных результатов.

Аннотация

Коробко Е. В. Гидромеханика электроструктурированных жидкостей. Диссертация (в виде рукописи) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы. Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, 1996.

Работа посвящена научному обоснованию механизма обратимого нелинейного изменения гидромеханических характеристик электроструктурированных жидкостей (электрореологический эффект) и разработке основ технологии их применения в различных устройствах

и технологиях. На основе поляризационной модели взаимодействия элементов "плохого" диэлектрика в диэлектрических жидкостях. разработаны новые эффективные рецептуры ЭРЖ. Выполнен комплекс измерений текучести ЭРЖ в широком диапазоне деформации и скоростей сдвига. Показано, что механическое поведение ЭРЖ определяется сочетанием нелинейной вязкости, пластичности и упругости и описывается в области непрерывного сдвигового течения четырехпараметрическим уравнением состояния нелинейного типа с коэффициентами, зависящими от интенсивности электрического воздействия. Обнаружено вязко-упругое поведение и ползучесть ЭРЖ в области малых деформаций, а также установлено влияние электрического поля на характеристики переноса импульса (УЗ) и тепла. Сформулирована и численно решена задача течения нелинейно-вязкопластичной жидкости в соосно-цилиндрическом канале-конденсаторе. Сопоставление с результатами проведенного эксперимента подтвердило правомерность принятой поляризационной модели и реологического уравнения состояния для описания ЭРЖ. Полученные теоретико-экспериментальные результаты использованы для разработки и создания многих приложений ЭРЖ - в гидравлике, гидроавтоматике, виброизоляции с управляемым демпфированием, технологии фиксации объектов при механообработке, виброиспытаниях и в робототехнике, а также для задач теплотехники и акустики. Ключевые слова: течение, вязкопластичные жидкости, структура, напряженность электрического поля, гидроканал, клапан, демпфер, крепежное устройство.

РЕЗЮМЕ

Коробко Євгенія Вікторівна.

Гідромеханіка електроструктурованих рідин.

Ключеві слова: потік, в'язкопластичні рідини, структура, напруга електричного поля, гідроканал, клапан, демпфер, кріпильний пристрій.

В результаті виконання дисертаційної роботи науково обґрунтовано механізм оборотної нелінійної зміни гідромеханічних характеристик електроструктурованих рідин (електрореологічний ефект) на основі поляризационної моделі взаємодії елементів "поганого" діелектрика в діелектричних рідинах. Розроблені нові ефективні рецептури ЕРР у широкому діапазоні деформації і швидкостей зрушення. Показано, що механічна поведінка ЕРР визначається сполученням в'язкості і пластичності і описується в області безперервного зрушеного потоку чотирипараметричним рівнянням стану нелінійного типу з коефіцієнтами, залежними від інтенсивності електричної дії. Виявлено прояв ЕРР в електричних полях в'язко-пружних властивостей і повзучості в області малих деформацій, а також встановлено вплив електричного поля на характеристики переносу імпульсу (УЗ) і тепла. Сформульована і чисельно вирішена задача потоку нелінійно-в'язкопластичної рідини в співосово-циліндричному каналі-конденсаторі. Визначені залежності поля швидкостей і величин гідравлічних характеристик від інтенсивності електричного поля. Зіставлення з результатами проведеного експерименту підтвердило правомірність використання поляризационної моделі і рівняння стану, вибраних для опису ЕРЖ. Отримані теоретико-експериментальні результати використані для розробки і різноманітного використання ЕРЖ - в гидравліці, гидроавтоматиці, віброізоляції з керуваним демпфуванням в технології фіксації об'єктів при механообробці, вібровипробуваннях і в робототехніці, а також для задач теплотехніки.

Abstract

Korobko Evguenia Viktorovna. Fluid Mechanics of Electrostructurized Fluids.

Key words: flow, viscoplastic fluids, structure, electric intensity, hydraulic channel, value, damper, fixing unit.

A dissertation (in the manuscript form) for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 01.02.05 - Mechanics of fluid, gas and plasma. Heat and Mass Transfer Institute of Belarus Academy of Sciences. 1996.

The present work provides a scientific ground for the mechanism of a reversible non-linear change of hydromechanical characteristics of electrostructurized fluids (electrorheological effect) based on the polarization model of interaction of elements of a "bed" dielectric in dielectric fluids. New effective ER-fluid composition are developed. A complex of measurements of fluidity characteristics of ER-fluids has been carried out in a wide range of strain and shear rates. It is shown that a mechanical behavior of ER-fluids depends on viscosity and plasticity in combination and described in the field of continuous shear flow by the four-parameter equation of state of a non-linear type with coefficients dependent on an intensity of an electric field. It is found that in the presence of electric fields ER-fluids manifest their viscoelastic properties and creep in shear in the field of low strains. Moreover, an electric field is found to exert an influence on the characteristics of momentum and heat transfer.

A problem of non-linear cylindrical condenser-channel is formulated and numerically solved. A velocity field and hydraulic characteristics as a function of the electric intensity are determined. A comparison of results of the conducted experiment with theory have confirmed the validity of the polarization model and the equation of chosen to desirable an ER-effect. The obtained theoretical and experimental results have been employed for development and design of numerous ER-effect applications: in hydraulic, hydroautomatics, vibroinsulation with controllable damping, technologies of fixing the objects under machining and vibration test conditions, in robotics as well as for heat engineering purposes.

Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига ЭРЖ (ЛМ) при различных напряжениях электрического поля и содержания наполнителя: 1 - $C = 5\%$, 2, 4 - 20; 3, 5 - 7 - 40%. 1 - 3 - $E = 0$, 5 - 0,5, 6 - 1,0; 7 - 1,5 кВ/мм

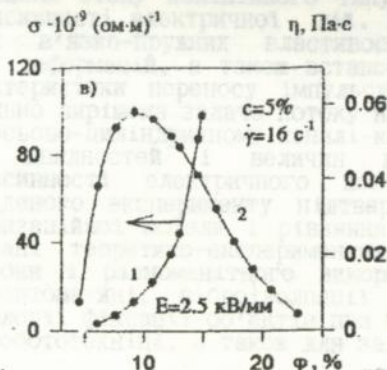
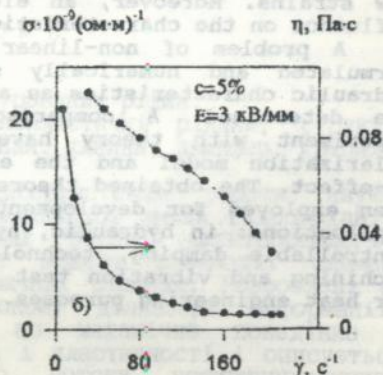
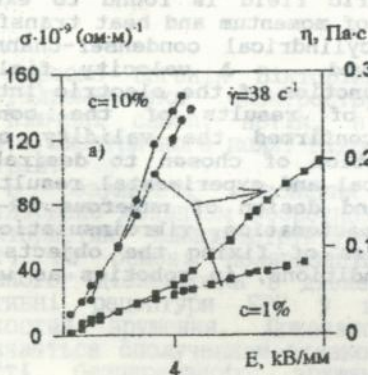
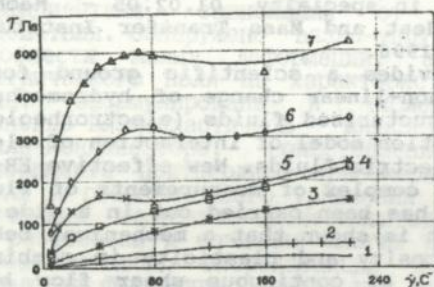


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости η и электропроводности σ ЭРЖ от (а) напряженности электрического поля, (б) скорости сдвига, (в) влажности наполнителя

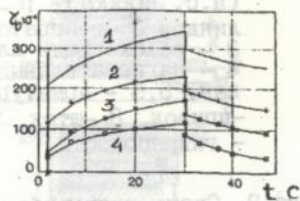


Рис.3. Влияние электрического поля на кинетику развития деформации в ЭРЖ: 1 - $E = 1$ кВ/мм, 2 - 1,2; 3 - 1,4; 4 - 1,6. $\zeta = 100$ Па

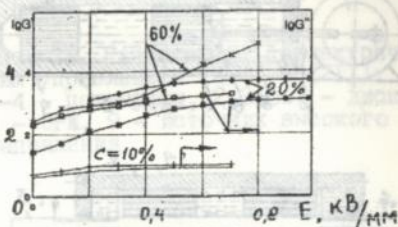


Рис.4. Зависимость модулей упругости G' и потерь G'' от интенсивности электрического воздействия



Рис.5. Схема течения вязкопластичной среды в соосно-цилиндрическом канале

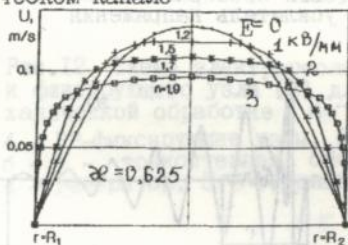


Рис.7. Профиль скорости при течении нелинейно-вязкопластичной среды в соосно-цилиндрическом канале

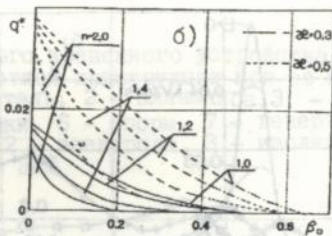
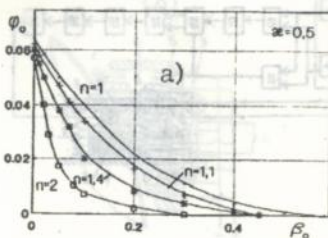


Рис.6. Зависимость безразмерной скорости (а) и расхода (б) ЭРЖ от параметра пластичности β_0

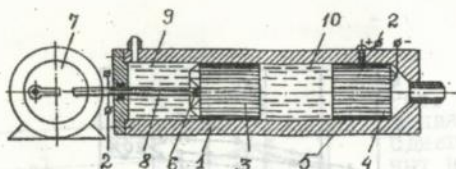


Рис.8. Схема насоса для перекачки диэлектрических суспензий (а.с. 606001): 1 - цилиндр, 2 - генератор, 3 - всасывающий клапан, 4 - нагнетательный клапан, 5,6 - арматура, 7 - привод, 8 - шток, 9,10 - гидроразности

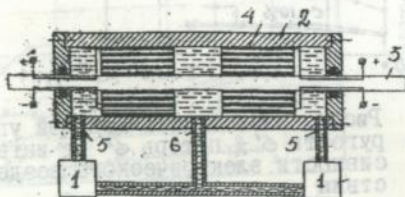


Рис.9. Схема гидровибратора с ЭР-жидкостью (а.с. 619218): 1 - насос, 2 - цилиндр, 3 - шток, 4 - ЭР-клапаны, 5,6 - гидромагистраль

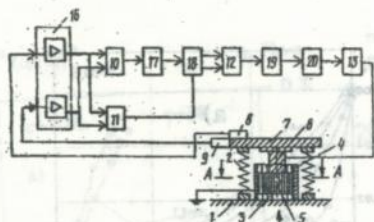
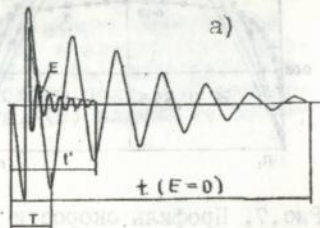
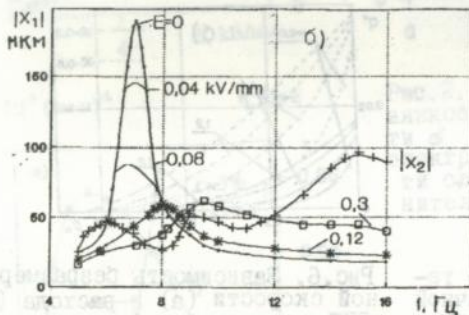


Рис.10. Система активной виброизоляции с ЭР-демпфером вязкого трения и ее характеристики при (а) свободных и (б) вынужденных колебаниях объекта 1 - основание, 2 - пружины, 3 - ЭРЖ, 4 - ЭР-демпфер, 5 - поршень-электрод, 6 - шток, 7 - объект, 8,9 - датчики колебаний, 10 - усилитель, 11 - компаратор, 12 - запоминающее устройство, 13 - генератор, 14, 15 - электроды, 16 - блок полосовых усилителей, 17 - АЦП, 18 - мультиплексор, 19 - цифро-аналоговый преобразователь, 20 - усилитель напряжения



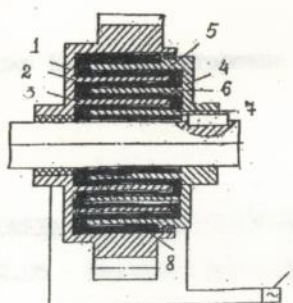


Рис. 11. Схема муфты с электрическим управлением (а.с. 684211):
1-4 - полумуфты, 2,3,5-7 - диски,
8 - ЭРЖ, 9 - источник высокого напряжения

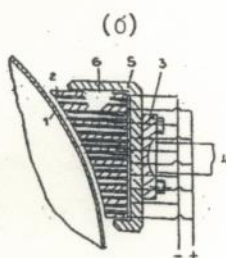
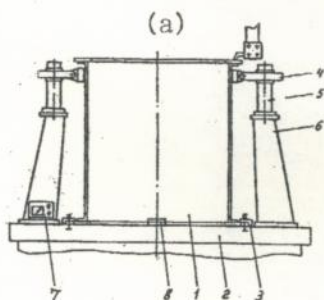


Рис. 12. Схема электрореологического крепежного устройства (а) и фиксирующего узла (б) для нежесткой конструкции при ее механической обработке. а - 1 - деталь, 2 - планшайба, 3 - крепеж, 4 - ЭР-фиксирующие узлы, 5 - стойки, 6 - опоры, 7 - генератор б - 1 - тонкостенная оболочка, 2 - электроды, 3 - изоляция, 4 - генератор, 5 - основание, 6 - ЭРЖ

Коробко Евгения Викторовна

ГИДРОМЕХАНИКА ЭЛЕКТРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

О1.02.05 - механика жидкостей, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 14.05.96 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага типогр. н 2. Офсетная печать

Усл.печ. л. 1.9 Уч.- изд.л. 2,0 Тираж 100 Заказ 112

АНК "Институт тепло-и массообмена им.А.В.Лыкова" АН Беларуси.
220072, Минск, П.Бровки, 15

Отпечатано на ротапринте АНК "Институт тепло-и массообмена
им.А.В.Лыкова" АН Беларуси. 220072, Минск, П.Бровки, 15

Отпечатано на ротапринте ИТМО АН Беларуси. Минск, П.Бровки, 15.

436425

AB 35.048