

Отчет на 30.06.2023 г. по гранту РФФ «Исследование тепловых и гидродинамических эффектов в нанодисперсных магнитных жидкостях для разработки моделей и методик расчёта высокоскоростных и высокотемпературных герметизаторов», рук. Нестеров С.А.

Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период (**фактически проделанная работа, от 3 до 10 стр.**)

1. Разработать план и методику проведения эксперимента для комплексной оценки свойств и характеристик магнитных жидкостей при работе в высокоскоростных и высокотемпературных магнитожидкостных герметизаторах.

Целями проведения эксперимента является сбор данных для верификации результатов численного расчёта взаимодействующих физических полей и комплексная оценка работоспособности МЖ в высокоскоростных и высокотемпературных магнитожидкостных герметизаторах (МЖГ).

Для предварительной количественной оценки степени влияния исследуемых факторов проведено численное моделирование взаимодействующих магнитного и гидродинамического полей в осесимметричной постановке на одном зубцовом делении МЖГ. С целью анализа влияния геометрии зубца и физических свойств МЖ на энергию вязкостных потерь, выделяющихся в магнитожидкостной пробке при вращении вала составлен ортогональный план и проведён полный факторный эксперимент 2^n по $n = 7$ факторам с двумя уровнями варьирования факторов: -1 для минимального значения и +1 для максимального значения. Полное число возможных сочетаний значений 7 факторов (число опытов, а значит и число строк плана) равно $N=2^7=128$.

При разработке плана проведения эксперимента исследования, необходимые для комплексной оценки свойств и характеристик магнитных жидкостей при работе в высокоскоростных и высокотемпературных магнитожидкостных герметизаторах были разделены на три большие группы, каждая из которых содержит набор опытов, необходимых как для создания и верификации математических моделей, получения эмпирических зависимостей и выявления закономерностей для разработки методики проектирования, так и для оценки эффективности работы конкретной МЖ в составе МЖГ. Экспериментальные исследования включают в себя:

1. Исследование физических свойств изготовленных МЖ:

1.1. Снятие кривых намагничивания МЖ баллистическим методом;

1.2. Снятие реологических кривых МЖ при разной температуре;

1.3. Измерение плотности МЖ.

2. Исследование изменения удерживаемого перепада давления высокоскоростных МЖГ:

2.1. Влияние геометрии рабочей зоны и линейной скорости на поверхности вала на удерживаемый МЖГ перепад давления;

2.2. Влияние плотности МЖ на изменение удерживаемого перепада давления с ростом линейной скорости на поверхности вала;

2.3. Влияние намагниченности МЖ и индукции магнитного поля на удерживаемый МЖГ перепад давления;

2.4. Влияние объёма заправки МЖ на удерживаемый МЖГ перепад давления.

3. Исследование вязкостного разогрева МЖ при работе в высокоскоростных герметизаторах:

3.1. Исследование разогрева экспериментальной установки от тока в катушке управления;

3.2. Исследование влияния вязкости МЖ на её разогрев при работе в высокоскоростных МЖГ;

3.3. Исследование влияния геометрии рабочей зоны на разогрев МЖ в МЖГ.

3.4. Исследование влияния объёма МЖ на её разогрев и создаваемый момент трения при работе в высокоскоростных МЖГ.

По каждому пункту плана разработаны методические указания по проведению эксперимента, включающие подробную последовательность действий и методические рекомендации

2. Создать экспериментальный стенд для исследования работы нанодисперсной магнитной жидкости в составе магнитожидкостного герметизатора.

Для экспериментального исследования был разработан и собран экспериментальный стенд.

Приводной двигатель АИР56А2 приводит во вращение вал электромагнита. Частота вращения двигателя, регулируется преобразователем частоты VT100-0R7-1B в пределах от 0 до 3500 об/мин, измеряется тахометрическим датчиком ROTARY ENCODER TYPE LPD 3806-360BM-G5-24C и передаётся в ЭВМ с помощью коннектора интерфейсной платы ввода/вывода сигналов National Instruments PCI 6023E, имеющей возможность в режиме реального времени опрашивать 8 аналоговых

и 8 цифровых каналов. Частота вращения в 3408 об/мин соответствует линейной скорости на поверхности вала МЖГ в 25 м/с.

Мощность, потребляемая приводным двигателем отображается на измерителе мощности. По показаниям измерителя мощности с учётом отделения потерь в электродвигателе и электромагните возможно произвести оценку мощности, выделяемой в магнитожидкостной пробке от вязкостного трения и рассчитать момент трения МЖГ.

Питание катушки управления электромагнита осуществляется от трансформаторного, стабилизированного лабораторного источника постоянного тока QJ6010E, позволяющего регулировать напряжение в пределах от 0 до 60 вольт, что соответствует току в катушке управления от 0 до 2,65А и создавать магнитное поле в зазоре МЖГ с индукцией до 2 Тл. Имеется возможность изменять полярность подаваемого на катушку управления напряжения.

На корпус электромагнита через немагнитную прокладку толщиной 2 мм установлен стальной корпус МЖГ с возможностью замены внутренней неподвижной полюсной приставки на требующуюся в соответствии с программой испытания. На вал электромагнита по скользящей посадке устанавливается вал МЖГ с наружным диаметром 140 мм. Имеется возможность использования двух вариантов вала МЖГ – гладкий вал или вал, имеющий зубец. Для комплексной оценки рабочих характеристик МЖГ разработаны и изготовлены ряд неподвижных полюсных приставок и валов, взаимная комбинация которых позволяет охватить все наиболее распространённые и реально применяющиеся в промышленности конструкции МЖГ.

Неподвижная полюсная приставка и вал герметизатора образуют рабочий зазор МЖГ, заполняемый МЖ.

К неподвижной полюсной приставке через уплотнительное кольцо установлена крышка из литого поликарбоната с штуцером присоединения шланга для нагнетания давления в верхней части герметизатора. Сжатый воздух поступает от компрессора через электромагнитный клапан и игольчатый кран, используемый для тонкой регулировки расхода газа. Измерение давления в рабочей камере производится аналоговым датчиком, пропорциональный давлению электрический сигнал с которого поступает на плату ввода/вывода сигналов PCI 6023E.

Нагрев МЖГ до требуемой температуры осуществляется установкой на корпус МЖГ вместо змеевика термостата хомутового ТЭНа. Управление нагревом осуществляется на основе сигнала с термодатчика ПИД регулятором, осуществляющим коммутацию твердотельного реле.

Для непосредственного контроля температуры МЖ и элементов экспериментального стенда использован инфракрасный тепловизор UNI-T UTi260A. Так как измерение температуры на блестящих металлических поверхностях им затруднено, на них нанесена термостойкая краска.

Из-за нелинейности и гистерезиса магнитных свойств стали использование значений тока для определения величины магнитной индукции в рабочем зазоре даст большую ошибку. Для решения этой проблемы используется датчик Холла, установленный в зазоре между корпусом электромагнита и корпусом МЖГ, образованном двухмиллиметровой немагнитной прокладкой, пропорциональный магнитной индукции электрический сигнал с которого поступает на плату ввода/вывода сигналов PCI 6023E.

Сбор данных и обработка сигналов с платы ввода/вывода сигналов PCI 6023E осуществляется разработанной программой в среде LabVIEW.

3. Разработать технические требования к нанодисперсной магнитной жидкости и изготовить экспериментальные образцы на базе Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики.

Для проведения всестороннего исследования работоспособности МЖ в высокоскоростных и высокотемпературных МЖГ в ходе проведения экспериментов необходимо использовать МЖ на основе четырёх наиболее распространённых в уплотнительной технике жидкостей-основ: минеральное и синтетическое масло, полиэтилсилоксановая и полиметилсилоксановая жидкости. Использование в герметизаторах наиболее распространённой МЖ на основе керосина не целесообразно в силу его высокой испаряемости.

Использование МЖ на различных жидкостях основах с отличающимися температурными зависимостями вязкости, плотности, испаряемости позволило получить необходимый набор данных для разработки моделей и методик расчёта высокоскоростных и высокотемпературных герметизаторов.

Намагниченность насыщения МЖ является важнейшим параметром, влияющим на рабочие свойства МЖГ, так как от её величины, и величины градиента магнитной индукции, напрямую зависит максимальный удерживаемый перепад давления. Однако, увеличение содержания твёрдой магнитной фазы кроме роста намагниченности насыщения приводит к значительному (до нескольких десятков раз) увеличению вязкости МЖ, что вызовет сильный разогрев жидкости при работе в

высокоскоростных МЖГ и потребует увеличения величины рабочего зазора для снижения диссипативных потерь, что в свою очередь приведёт к снижению максимального значения магнитной индукции в зазоре МЖГ и снижению удерживаемого перепада давления.

Зачастую МЖГ на промышленное оборудование, в частности на электрические двигатели, ставят только для гарантированного отделения внешней взрыво- или пожароопасной среды от его внутреннего объёма. Уплотнение в данном случае удерживает лишь небольшой перепад давления, связанный с разогревом воздуха внутри работающего устройства. В этом случае эффективным способом снижения вязкостного разогрева МЖ видится снижение содержания объёмной фазы и, как следствие, вязкости и намагничённости насыщения.

При увеличении процентного содержания магнитной фазы наступает момент, при котором вязкость МЖ начинает резко увеличиваться, так как мы приближаемся к состоянию плотной упаковки частиц. Концентрация магнитной фазы, при котором наступает резкое увеличение вязкости, для разных жидкостей-основ различно и зависит от длины молекулы жидкости, а значит и её вязкости.

Применение в МЖГ жидкостей с подобными повышенными концентрациями магнитной фазы нецелесообразно вследствие резкого увеличения потерь.

Таким образом для проведения экспериментальных исследований на базе Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики было изготовлено:

1. Четыре образца МЖ с намагничённостью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе синтетического масла объёмом по 50 мл.
2. Четыре образца МЖ с намагничённостью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе полиэтилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл.
3. Четыре образца МЖ с намагничённостью насыщения 30, 40, 50, 57 кА/м на основе полиметилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл.
4. Четыре образца МЖ с намагничённостью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м на основе минерального масла объёмом по 50 мл.

4. Провести экспериментальные исследования образцов нанодисперсной магнитной жидкости при работе в составе магнитожидкостного герметизатора.

1. Проведено исследование физических свойств изготовленных МЖ, таких как снятие кривых намагничивания МЖ баллистическим методом; снятие реологических кривых МЖ при разной температуре; измерение плотности МЖ. Собраны и обобщены физические свойства изготовленных МЖ, такие как объёмная и массовая доли магнитной фазы и поверхностно-активного вещества, теплоёмкость и теплопроводность основы, магнитной фазы и поверхностно-активного вещества.
2. Проведено исследование влияния на изменение удерживаемого перепада давления высокоскоростных МЖГ геометрии рабочей зоны и линейной скорости на поверхности вала; плотности МЖ на изменение удерживаемого перепада давления с ростом линейной скорости на поверхности вала; намагничённости МЖ и индукции магнитного поля на удерживаемый МЖГ перепад давления; объёма заправки МЖ на удерживаемый МЖГ перепад давления.
3. Проведено исследование вязкостного разогрева МЖ при работе в высокоскоростных герметизаторах, в частности исследование влияния вязкости МЖ на её разогрев при работе в высокоскоростных МЖГ; исследование влияния геометрии рабочей зоны на разогрев МЖ в МЖГ; исследование влияния объёма МЖ на её разогрев и создаваемый момент трения при работе в высокоскоростных МЖГ.

Все планируемые в отчетный период работы выполнены полностью:

да

Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде *(от 1 до 5 стр.)*

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований, заявленных в плане работы за отчетный период, достигнуты следующие основные научные результаты.

1. В ходе разработки плана и методики проведения эксперимента для комплексной оценки свойств и характеристик магнитных жидкостей при работе в высокоскоростных и высокотемпературных магнитожидкостных герметизаторах в результате математического моделирования получены картины распределения магнитного поля и давления в зазоре МЖГ. Рассчитано изменение формы и положения магнитожидкостной пробки под действием центробежных сил и стороннего давления для разных конфигураций рабочего зазора МЖГ.

В результате анализа весовых коэффициентов полнофакторного эксперимента показано, что основное влияние на диссипативный разогрев МЖ оказывают величина рабочего зазора между зубцом и корпусом, ширина площадки у вершины зубца, радиус вала и вязкость МЖ. В то время, как влияние угла скоса зубца и плотности при анализе вязкостного разогрева можно не учитывать. В ходе верификации полинома по промежуточным точкам выяснено, что влияние диаметра вала и величины рабочего зазора носит нелинейный характер и использование полинома первого порядка хотя и даёт совпадение результатов в граничных точках, но расхождение в промежуточных точках факторного пространства достигает 30%.

При увеличении частоты вращения с 500 до 3000 об/мин, т.е. в 6 раз, все весовые коэффициенты увеличиваются в 34-36 раз из чего можно сделать вывод о квадратичном влиянии частоты вращения вала как на вязкостные потери в МЖ в целом, так и на вклад каждого отдельного кодированного фактора.

2. В процессе разработки и создания экспериментальной установки для исследования работы нанодисперсной магнитной жидкости в составе магнитожидкостного герметизатора с диапазоном изменения линейной скорости на поверхности вала от 0 до 25 м/с и температуры магнитной жидкости в зазоре от 20 до 130 градусов Цельсия решена проблема невозможности непосредственного измерения магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ при нахождении в нём МЖ путём численного моделирования распределения магнитного поля. Для верификации и корректировки результатов моделирования изготовлена полюсная приставка с увеличенным зазором между ней и валом, что позволяет поместить в него щуп тесламетра и по зависимостям индукции в рабочем зазоре и магнитного потока через вал электромагнита от индукции в измерительном зазоре откалибровать численную математическую модель магнитной системы испытательного стенда и МЖГ.

В ходе предварительного анализа выяснено, что основным путём компенсации центробежных усилий в высокоскоростных МЖГ является изготовление полюсных приставок гладкими и выполнение зубцов герметизатора на вращающемся валу. При подобной комбинации магнитожидкостная пробка за счёт центробежной силы смещается по поверхности вала в зону максимальных индукций магнитного поля, что позволяет не просто предотвратить уменьшение критического перепада давления МЖГ, но даже увеличить его при высоких скоростях вращения вала.

Показано, что существенное влияние на вязкостный разогрев МЖ оказывает величина рабочего зазора МЖГ. Увеличением зазора возможно значительно уменьшить градиент скорости и вязкостные потери. Для исследования тепловых и гидродинамических эффектов в МЖГ выполнен ряд гладких полюсных приставок, образующих с зубчатым валом рабочие зазоры величиной 0,2, 0,5 и 0,8 мм. Зубчатые полюсные приставки выполнены с углом зубца в 40, 50 и 60 градусов.

Универсальность экспериментального стенда и изготовленный широкий ряд образцов МЖ на основе синтетического и минерального масла, кремнийорганических жидкостей позволит в дальнейшем продолжить экспериментальное изучение влияния на работоспособность МЖГ таких мало или не изученных факторов, как перераспределение магнитной фазы в сильноградиентных магнитных полях, влияние ускорения, вибрации, эксцентриситета вала на удерживаемый МЖГ перепад давления. В дальнейшем выполнить ресурсные испытания МЖГ.

3. Изготовлены экспериментальные образцы нанодисперсной магнитной жидкости с объёмным содержанием твёрдой фазы от 5 до 20 объёмных процентов, с намагниченностью насыщения от 20 до 80 кА/м на различных синтетических и минеральных углеводородных маслах, кремнийорганических жидкостях.

В результате анализа выяснено, что при увеличении процентного содержания магнитной фазы наступает момент, при котором вязкость МЖ начинает резко увеличиваться. Концентрация магнитной фазы, при котором наступает резкое увеличение вязкости, для разных жидкостей-основ различна и зависит от длины молекулы жидкости, а значит и её вязкости. Применение в МЖГ жидкостей с подобными повышенными концентрациями магнитной фазы нецелесообразно вследствие резкого увеличения потерь, что ограничивает максимальную намагниченность насыщения и процент содержания твёрдой фазы в МЖ, рекомендованных для высокоскоростных МЖГ.

Для проведения экспериментальных исследований на базе Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики было изготовлено:

1. Четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м (с объёмным содержанием твёрдой фазы 4,44, 6,67, 8,89, 11,11 % соответственно) на основе синтетического масла объёмом по 50 мл.
2. Четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м (с объёмным содержанием твёрдой фазы 4,44, 6,67, 8,89, 11,11 % соответственно) на основе полиэтилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл.

3. Четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 30, 40, 50, 57 кА/м (с объёмным содержанием твёрдой фазы 6,67, 8,89, 11,11, 12,67 % соответственно) на основе полиметилсилоксановой жидкости объёмом по 50 мл.

4. Четыре образца МЖ с намагниченностью насыщения 20, 30, 40, 50 кА/м (с объёмным содержанием твёрдой фазы 4,44, 6,67, 8,89, 11,11 % соответственно) на основе минерального масла объёмом по 50 мл.

4. Проведены экспериментальные исследования изготовленных образцов нанодисперсной магнитной жидкости, достаточные для создания и верификации численных моделей взаимовлияющих магнитного, гидродинамического и температурного полей. Для использования при создании математических моделей и методики расчёта экспериментально получены, собраны и обобщены физические свойства изготовленных МЖ.

Выполнение зубцов на неподвижной полюсной приставке позволяет сделать МЖГ взаимозаменяемым со стандартной крышкой подшипникового щита электродвигателя и не требует внесения в его конструкцию дополнительных изменений. Однако с ростом частоты вращения, перепад давления, удерживаемый герметизатором подобной конструкции значительно снижается и для рекомендуемой магнитной индукции в зазоре, равной 0,8 Тл при линейной скорости в 25 м/с уменьшается практически в два раза по сравнению с неподвижным валом.

Показано, что несмотря на то, что выполнение зубцов на валу снижает удобство замены стандартной крышки подшипника электродвигателя на МЖГ, для быстро вращающихся валов большого диаметра такое исполнение МЖГ оправданно, так как позволяет не только сохранить удерживаемый перепад давления, но даже повысить его по сравнению с неподвижным валом. При подобном исполнении с началом движения вала удерживаемый перепад давления вначале незначительно снижается, так как возникающее течение МЖ снижает стабильность магнитоожидкостной пробки. С дальнейшим ростом частоты вращения зубчатого вала за счёт того, что центробежная сила толкает МЖ в область с большим градиентом магнитного поля удерживаемый МЖГ перепад давления начинает расти и при линейной скорости в 25 м/с превышает значение, полученное для неподвижного вала.

Анализ изменения критического давления МЖГ и установившейся температуры МЖ в зависимости от площади поперечного сечения магнитоожидкостной пробки, напрямую связанной с объёмом заправляемой жидкости показал, что температура при увеличении объёма МЖ растёт практически линейно, а удерживаемый МЖГ перепад давления значительно возрастает при увеличении площади МЖ пробки от 2 до 4 мм, однако в дальнейшем при добавлении МЖ растёт уже не так значительно. Разработка методики расчёта оптимального объёма МЖ является актуальной научной задачей. Выяснено, что определяющее значение на разогрев МЖ при работе в высокоскоростных МЖГ оказывает вязкость МЖ при высоких температурах. Например, МЖ на основе синтетического масла при комнатной температуре имеет вязкость в 3.1 раза больше, чем МЖ на основе полиэтилсилоксановой жидкости, но благодаря гораздо более выраженной температурной зависимости уже через 10 минут работы МЖГ температура жидкости на основе полиэтилсилоксана начинает превышать температуру МЖ на основе синтетического масла и через 60 минут работы эта разница достигает 5,6 К. Использование гораздо менее вязкой МЖ на основе полиметилсилоксановой жидкости позволяет значительно уменьшить разогрев МЖГ, особенно при работе в повторно-кратковременном режиме.

Таким образом, все заявленные результаты получены:

- разработан план и методика проведения эксперимента для комплексной оценки свойств и характеристик магнитных жидкостей при работе в высокоскоростных и высокотемпературных магнитоожидкостных герметизаторах;
- разработана и создана экспериментальная установка для исследования работы нанодисперсной магнитной жидкости в составе магнитоожидкостного герметизатора с диапазоном изменения линейной скорости на поверхности вала от 0 до 25 м/с и температуры магнитной жидкости в зазоре от 20 до 130 градусов Цельсия;
- изготовлены экспериментальные образцы нанодисперсной магнитной жидкости с объёмным содержанием твёрдой фазы от 5 до 20 объёмных процентов, с намагниченностью насыщения от 20 до 80 кА/м на различных синтетических и минеральных углеводородных маслах, кремнийорганических жидкостях;
- получены результаты экспериментальных исследований изготовленных образцов магнитной жидкости.