

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

*На правах рукописи*



**ВЛАСОВ Алексей Михайлович**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ  
ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание  
учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Казаков Юрий Борисович

Иваново – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	4
1. АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	11
1.1. Способы герметизации вращающихся валов электродвигателей . . . . .	11
1.2. Электродвигатели с повышенной степенью герметизации . . . . .	13
1.3. Применение магнитных жидкостей (МЖ) в электродвигателях, магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) вращающихся валов . . . . .	19
1.4. Особенности магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей . . . . .	28
1.5. Выводы и постановка задач исследований . . . . .	32
2. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ . . . . .	36
2.1. Формирование элементной структуры электротехнической системы . . . . .	36
2.2. Разработка конструкций управляемых МЖГ валов электродвигателей . . . . .	39
2.3. Способ, схема и средства управления электротехнической системой . . . . .	41
2.5. Разработка и анализ схемы функционирования системы магнитожид- костной герметизации валов регулируемых электродвигателей . . . . .	43
2.6. Выводы . . . . .	46
3. СИСТЕМНЫЕ СВЯЗИ, МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ . . . . .	47
3.1. Анализ системных связей элементов в электротехнической системе . . . . .	47
3.2. Обоснование условий регулирования, математическая модель и алгоритм формирования управляющих воздействий в системе . . . . .	54
3.3. Применение методов планирования эксперимента для формализации системных связей в системе магнитожидкостной герметизации . . . . .	59
3.4. Имитационные модели и программа моделирования электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей . . . . .	62
3.5. Выводы . . . . .	66

4. УТОЧНЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ . . . . .	67
4.1. Моделирование и анализ магнитного поля МЖГ с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе . . . . .	67
4.2. Расчетное исследование влияния регулирующей обмотки на МЖГ . . . . .	76
4.3. Уточненное моделирование удерживаемого перепада давлений МЖГ . . . . .	80
4.4. Определение формы поверхности и распределения поля скоростей течения МЖ в зазоре магнитожидкостного герметизатора . . . . .	84
4.5. Расчет мощности потерь, момента трения и теплового состояния МЖГ . . . . .	89
4.6. Учет шероховатостей деталей МЖГ при анализе приповерхностного распределения магнитного поля и определении площади контакта МЖ . . . . .	101
4.7. Исследование влияния вязкости МЖ, частоты вращения вала, шерохо- ватостей деталей и времени работы на момент трения и нагрев МЖГ . . . . .	105
4.8. Выводы . . . . .	112
5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ . . . . .	114
5.1. Технологические способы снижения момента трения, повышения ресурса и надежности МЖГ вала электродвигателя . . . . .	114
5.2. Физическая модель регулируемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей . . . . .	119
5.3. Экспериментальные исследования магнитожидкостной герметизации валов на физической модели . . . . .	122
5.4. Разработка усовершенствованного магнитожидкостного гермети- затора вала взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 . . . . .	133
5.5. Выводы . . . . .	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Результаты интеллектуальной деятельности . . . . .	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акты внедрения . . . . .	154

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Безопасная эксплуатация электродвигателей определяется, в первую очередь, их безаварийностью. Электродвигатели в системах регулируемого привода могут работать в условиях повышенной влажности и частоты вращения, широкого диапазона температур, во взрывоопасных, тяжелых и загрязненных зонах, при воздействии агрессивных и абразивных сред, повышенном перепаде давлений между внешней средой и внутренним объемом электродвигателя. Для безопасной эксплуатации при работе в таких условиях используют специальные электродвигатели с повышенной степенью герметизации: взрывозащищенные, взрывобезопасные, искробезопасные, рудничные и шахтные электродвигатели, электродвигатели насосов, тягодутьевых механизмов и механизмов топливоприготовления, работающие с вакуумными установками. Применяемые механические уплотнения вращающихся выходных валов (щелевые, лабиринтные, сальниковые, манжетные и др.) не обеспечивают достаточную пыле/газогерметичность и безопасность эксплуатации специальных электродвигателей при возможных частых пусках, реверсах и торможениях, изменениях частоты вращения, при низких потерях на трение, повышенной износостойкости вала к твердым частицам в зоне герметизации, не допускают изменения уровня герметизации при изменении режима работы электродвигателей.

Для безопасной эксплуатации электродвигателей эффективны магнито-жидкостные герметизаторы (МЖГ) валов с использованием магнитных жидкостей (МЖ). МЖ изменяют магнитные, вязкостные и теплофизические свойства при воздействии магнитного поля. МЖ удерживается магнитным полем индуктора в зазоре МЖГ между неподвижным полюсом и вращающимся валом, герметизирует зазор и разделяет области, возможно, с разными средами и давлениями. Перепад давлений в областях деформирует положение МЖ вследствие чего возникают магнитные силы, стремящиеся вернуть МЖ в положение, которое она занимала бы при отсутствии перепада давлений. В результате воздействующий перепад давлений уравнивается магнитным давлением в МЖ. Положение МЖ может изменяться до критического, далее происходит пробой МЖГ.

МЖГ устанавливаются в специальных электродвигателях в выносных подшипниковых узлах, подшипниковых щитах и даже подшипниковых крышках. Расширение применимости МЖГ в электродвигателях регулируемых приводов сдерживается рекомендациями по ограничению предельной линейной скорости МЖ на поверхности вала до 10 м/с. Это ограничивает максимальный вращающий момент и мощность электродвигателя при заданной частоте вращения.

Применяемые в настоящее время МЖГ рассчитаны на работу в установившихся режимах. Режимы работы электродвигателей от преобразователей частоты (ПЧ) характеризуются пусками, остановами и реверсами, сопровождаются изменениями тепловых и механических воздействий. Работа МЖГ в ненормальных режимах имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при анализе функционирования МЖГ. В электродвигателях с магнитопроводящими подшипниковыми щитами работу МЖГ необходимо рассматривать с учетом электромагнитных процессов в самом электродвигателе.

При изменении режима целесообразны управление и настройка характеристик МЖГ на условия работы электродвигателя: перепада давлений, частоты вращения вала, собственного момента трения при сохранении работоспособности МЖГ с учетом ограничения на температуру МЖ. В распространенных МЖГ используются постоянные магниты, у них затруднено изменение магнитного потока, что осложняет настройку свойств МЖГ при изменении условий работы электродвигателя. Для регулируемых электродвигателей, работающих в составе электропривода, с целью повышения безопасной эксплуатации, ресурса работоспособности и надежности герметизации целесообразна разработка и исследование усовершенствованных конструкций МЖГ с высокими эксплуатационными показателями и, в целом, электротехнической системы с возможностью управления свойствами МЖГ в зависимости от условий работы.

**Степень разработанности проблемы.** Разработка специальных регулируемых электродвигателей проводится в ПАО НИПТИЭМ, системы герметизации электродвигателей совершенствуются в УГАТУ. Электромеханические устройства с МЖ описаны учеными МЭИ (Копылов И.П.) и МАИ (Алиевский Б.Л.).

Магнитожидкостную смазку для двигателя-маховика применяют в ВНИИЭМ. Электротехнические системы виброзащиты и активной подвески автотранспорта на основе МЖ демпферов с управляемыми магнитореологическими свойствами развивают в СамГТУ. Электромеханический преобразователь с управляемым движением ферромагнитных частиц в нефти разрабатывают в ЮРГПУ. Управляемую МЖ сепарацию немагнитных материалов разрабатывают в ИГЭУ.

Исследования магнитожидкостной герметизации валов выполнены Орловым Д.В., Страдомским Ю.И., Казаковым Ю.Б., Морозовым Н.А., Михалевым Ю.О., Сизовым А.П., Полетаевым В.А., Перминовым С.М., Сайкиным М.С. (Иваново); Масловым П.П. (Новосибирск); Радионовым А.В. (Украина); Баштовым В.Г., Краковым М.С. (Белоруссия); учеными Y. Chen, W. Horak, M. Szczęch, D. Li, R. Zheng, Y. Zhang, Z. Yang, H. Wang. Применение МЖГ для повышения безопасности устройств исследуется в ИПСА ГПС МЧС России. В ИГЭУ синтезированы качественные МЖ, разрабатываются эффективные МЖГ. Среди зарубежных производителей МЖГ лидером является Ferrotec Corp. Однако к настоящему времени отсутствует системные решения в области разработки и применения в регулируемых электродвигателях управляемой магнитожидкостной герметизации, усовершенствованных конструкций регулируемых МЖГ, функциональных схем, моделей, алгоритмов и программ управления системой.

В связи с этим разработка и исследование электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей представляет актуальную научно-техническую задачу.

**Цель диссертации** – повышение эффективности герметизации регулируемых электродвигателей путем изменения свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы на основе применения электротехнической системы с управляемым магнитожидкостным герметизатором.

**Объект исследования** – электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

**Предмет исследования** – электромагнитные и электромеханические процессы в электротехнической системе в различных режимах.

### **Задачи исследования:**

- анализ применимости магнитожидкостных систем для герметизации валов регулируемых электродвигателях в различных режимах и условиях, при разнообразных внешних воздействиях;

- разработка электротехнической системы управляемой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей с повышенной эффективностью уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы для безопасной эксплуатации электродвигателей;

- выбор способа, средств управления, обоснование условий регулирования, разработка алгоритма и программы управления, имитационных моделей электротехнической системы магнитожидкостной герметизации электродвигателей;

- уточненное моделирование компонентов и расчетные исследования свойств электротехнической системы магнитожидкостной герметизации;

- практическая реализация и экспериментальные исследования системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проведены с использованием методов теории электротехники и автоматического управления. Расчетные исследования выполнены в программах Mathcad и Excel, имитационное моделирование - в системе LabView, твердотельное моделирование - в средах Solidworks и AutoCad, численное моделирование физических полей - в комплексах ElCut и ANSYS, экспериментальные исследования - с использованием физического моделирования и натурального эксперимента, обработка результатов исследований - с использованием методов планирования эксперимента.

### **Научная новизна**

1. Разработана электротехническая система герметизации валов регулируемых электродвигателей, отличающаяся применением управляемых магнитожидкостных герметизаторов и изменением свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий, режимов и условий работы.

2. Разработаны способ, алгоритм, условия и программа управления системой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей,

отличающиеся возможностью управления свойствами герметизаторов для безопасной эксплуатации электродвигателей.

3. Разработаны компьютерные и имитационные модели компонентов электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, отличающиеся учетом влияния электромагнитных процессов в электродвигателе, свойств герметизатора, частоты вращения, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепада давлений, температуры.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработанная электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, предложенный способ, средства, алгоритм и программа управления позволяют осуществлять регулируемое изменение уплотнительных свойств системы при изменении режима и условий работы электродвигателей, внешних воздействий.

2. Разработанные модели компонентов и имитационные модели электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей позволяют проводить уточненный анализ эффективности герметизации с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе, частоты вращения вала, магнитного состояния герметизатора, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепадов давлений, температуры.

3. Предложенные конструктивные решения позволяют реализовать управляемую электротехническую систему магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, снизить момент трения магнитожидкостных герметизаторов, повысить ресурс и надежность, безопасность эксплуатации электродвигателей.

4. Разработанный магнитожидкостный герметизатор вала взрывозащищенного двигателя ВРАБ225 может быть применен для других электродвигателей.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, структура, схема функционирования, компь-



ютерные модели компонентов и имитационные модели системы с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе, изменения частоты вращения вала, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепада давлений и температуры, изменения магнитного потока.

2. Способ, средства, условия, алгоритм и программа управления электротехнической системой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей при изменении внешних воздействий и режимов работы.

3. Конструктивные решения управляемых магнитожидкостных герметизаторов валов регулируемых электродвигателей со сниженным моментом трения герметизаторов, повышенным ресурсом и надежностью.

4. Результаты исследований свойств и характеристик электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

**Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности:** «... исследования по общим закономерностям преобразования ... электрической энергии,... принципы и средства управления объектами... Электротехнические системы ... должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование ... в широком диапазоне внешних воздействий.»; **в части области исследования:** п.1 «...изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических ... систем»; п.3 «Разработка ... электротехнических ... систем ..., алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности ... электротехнических ... систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...»; п.5 «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации ... электротехнических ... систем»; так как посвящена повышению эффективности герметизации регулируемых электродвигателей для их безопасной эксплуатации при изменении внешних воздействий, режимов и условий работы путем изменения свойств уплотнительной системы на основе разработки, анализа и применения электротехнической системы с управляемым магнитожидкостным герметизатором.

**Обоснованность и достоверность результатов и выводов** обусловлена использованием строгих математических методов, компьютерным моделированием на основе применения распространенных программных систем.

**Адекватность результатов** подтверждается согласованностью с опубликованными результатами, удовлетворительным совпадением с результатами физического моделирования, внедрением разработанных герметизаторов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждены на Международных научно-технических конференциях: «International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)» (Russia, Chelyabinsk, 2020), «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» (МКЭЭЭ-2020), «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.), Плесских научных конференциях по нанодисперсным магнитным жидкостям (2016, 2018, 2020 гг.); Всероссийских конференциях: «Электроэнергетика глазами молодежи» (ИГЭУ, 2013 г.), «ЭНЕРГИЯ» (Иваново, ИГЭУ, 2013, 2015 гг.), «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 2015 гг.), «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, 2017, 2018 гг.), «Машиноведение и инновации» (МИКМУС-2017, Москва, ИМФШ РАН) и др.

**По материалам диссертации опубликованы** 25 работ, из них: 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья индексирована в БД Scopus, 3 патента на изобретения и 1 свидетельство на программы для ЭВМ. Общий объем опубликованных работ 9,1 п.л. с авторским вкладом 3,23 п.л.

**Результаты диссертации внедрены** в виде усовершенствованного магнитожидкостного герметизатора вала для асинхронного взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 в АО «ЭЛДИН», что обеспечило повышенную надежность герметизации, снижение момента трения и безопасность эксплуатации специальных электродвигателей, а также в учебный процесс ИГЭУ по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» в дисциплине «Специальные электромеханические устройства».

# 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1. Способы герметизации вращающихся валов электродвигателей

Электродвигатели могут предназначаться для работы с разными нагрузками в условиях повышенной влажности, регулирования частоты вращения, частоты пусков и реверсов, широкого диапазона температур, во взрывоопасных, тяжелых и загрязненных зонах, при воздействии агрессивных и абразивных сред, при повышенном перепаде давлений между внешней средой и внутренним объемом электродвигателя, вплоть до вакуума. Электродвигатели имеют разную степень защиты IP, определяющую степень герметизации, т.е. степень непроницаемости в/из двигателя газов, паров, жидкостей, взвесей. Различие условий ра-

боты вызы-  
вает разли-  
чие гермети-  
зации.

Для  
герметиза-  
ции выход-  
ных валов  
электродви-  
гателей (рис.

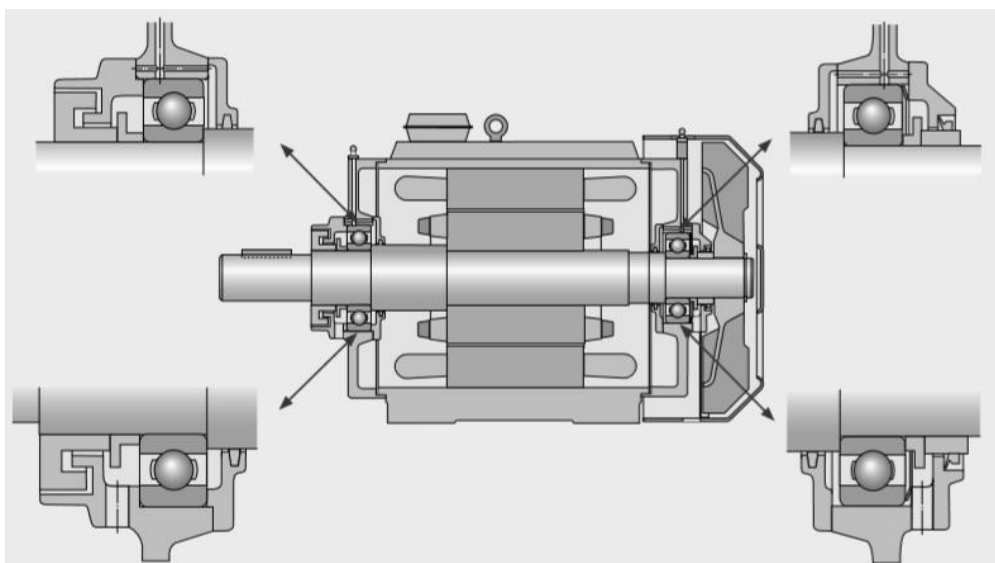


Рис. 1.1. Схема выходных концов вала электродвигателя с уплотнениями

1.1) применяют уплотнения зазоров - элементов системы герметизации, предотвращающих утечку веществ между вращающимся валом и неподвижными деталями [73]. Различают уплотнения с контактом между уплотняемыми элементами и бесконтактные. Бесконтактные уплотнения имеют меньшие потери, допускают повышенные скорости вращения вала, но не обеспечивают высокую степень герметизации.

В радиальном герметизаторе уплотняется зазор между соосными поверх-

ностями вращающегося вала и неподвижной части двигателя. Герметизатор чувствителен к радиальным биениям, но допускает небольшие осевые смещения. В торцевом герметизаторе уплотняется зазор между вращающейся и неподвижной плоскостями перпендикулярными оси вращения. Герметизатор чувствителен к осевым смещениям, но допускает небольшие радиальные биения.

В радиальных бесконтактных щелевых воздушных уплотнениях затруднено истечение газа или жидкости через узкий удлиненный щелевой зазор (рис. 1.2,а).

Повышение степени герметизации за счет

большого удлинения зазора обеспечивают лабиринтные уплотнения, которые могут быть радиальными или торцевыми (рис. 1.2,б) [120].

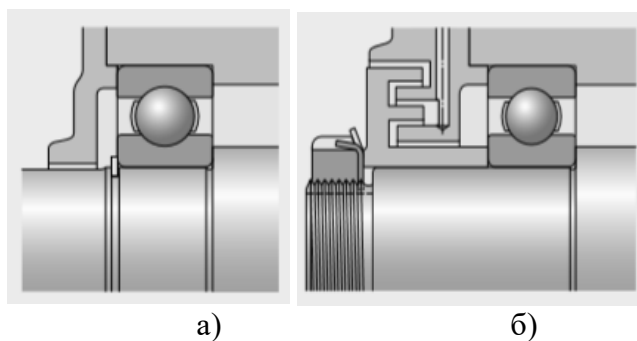


Рис. 1.2. Бесконтактные воздушные уплотнения: радиальное щелевое (а), торцевое лабиринтное (б)

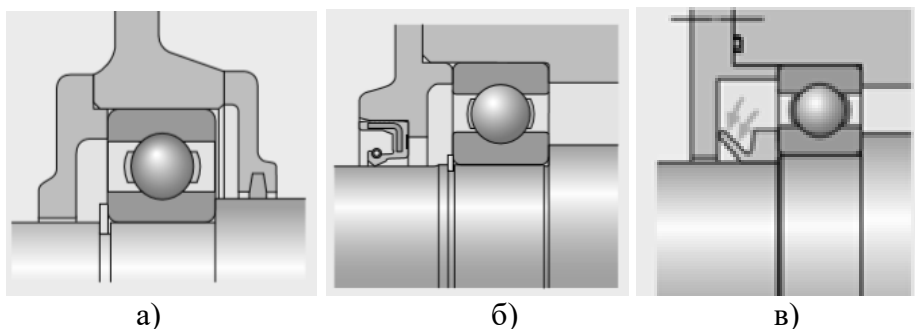


Рис. 1.3. Контактные уплотнения: а - комбинированное щелевое и сальниковое; б - радиальное манжетное; в - V-образное торцевое

Большая степень герметизации обеспечивается в контактном радиальном сальниковом уплотнении (рис. 1.3,а), в котором давление удерживается расклиниваемым сальником с низким коэффициентом трения, например, из фетра или эластичного полимера, который скользит по поверхности вращающегося вала. Допустимые скорости вращения невелики.

В радиальных манжетных уплотнениях (рис. 1.3,б) используется эластичная кольцевая манжета, например, из резины, армированная металлическим кольцом с пружиниванием, скользящая по поверхности вращающегося вала. Манжетные уплотнения не применяются при повышенных скоростях и при вы-

соких перепадах давлений. Механический контакт войлока сальника либо манжеты с валом приводит к повышенному собственному моменту трения и износу вала. В торцевых уплотнениях (рис. 1.3,в) зазор между корпусом и валом уплотняется эластичным кольцом на валу с малым коэффициентом трения, трущимся об аксиальную плоскость неподвижного корпуса. Могут применяться комбинированные уплотнения, например, совместно щелевые и сальниковые.

В таблице 1.1 сведены достоинства и недостатки рассмотренных уплотнений.

**Таблица 1.1.** Применимость уплотнений

Показатель	Тип уплотнения				
	Щелевое (Радиальное)	Лабиринтное (Радиальное/ Аксиальное)	Сальниковое (Радиальное)	Торцевое (Аксиальное)	Манжетное (Радиальное)
Допустимость осевых смещений	+	+	+	+	+
Допустимость радиальных смещений	-	-	+	+	+
Потери на трение	+++	+++	+	++	+
Повышенная скорость вала	+++	+++	+	++	+
Срок эксплуатации	+++	+++	+	++	+
Пыле/газогерметичность	-	-	+	++	++
Влагогерметичность:					
- в статике;	-	-	-	0	++
- в динамике;	-	-	-	0	++
- при повышенном перепаде давлений	-	-	-	0	+
Температурный диапазон					
- нижний, °С;	-70	-40	-40	-40	-80
- верхний, °С	+160	+100	+100	+200	+250
Износостойкость	-	0	+	++	+++

Знак: '-' – плохо; '0' – применяется; '+' - нормально; '++' – хорошо; '+++'- очень хорошо.

Уплотнение зазоров возможно жидкостью (жидким герметиком). Оно работоспособно при хорошей смачиваемости поверхностей зазора. Уплотнения имеют малые потери, допускают повышенные скорости вращения вала, но не обеспечивают достаточную герметичность при воздействии перепада давлений. Необходимо предусматривать способы удержания жидкости в зазоре.

Из анализа применимости уплотнений следует, что рассмотренные уплотнения не могут обеспечить повышенную пыле/газогерметичность двигателей при работе в широком диапазоне частоты вращения вала с низкими собственными потерями при повышенном перепаде давлений и износостойкости к твердым частицам, попадающим в зону герметизации.

## 1.2. Электродвигатели с повышенной степенью герметизации

В системах привода установок, работающих в различных режимах и условиях, в широком диапазоне внешних воздействий применяются специальные электродвигатели с повышенной степенью герметизации: взрывозащищенные, взрывобезопасные, искробезопасные, рудничные и шахтные электродвигатели, электродвигатели, работающие при повышенном перепаде давлений между внешней и внутренней средами, электродвигатели насосов, тягодутьевых механизмов и механизмов топливоприготовления и др. Безопасная эксплуатация таких электродвигателей и техногенная безопасность электродвигателей определяются их безаварийной работой [22,36].

**Взрывозащищенные** 3-фазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором серий ВАСО, 4ВР, ВРП, ВРК, АВР, АИМ, АИМР, АИМЛ, ВА, ВАО, 1ВАО, ВАДМ, ВРАБ и др. имеют повышенный класс взрывозащиты 1ExdeIIBT4 и выше, и предназначены для продолжительного режима работы в качестве приводов стационарных внутренних и наружных механизмов, применяемых в взрывоопасных зонах производств химической, газовой, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности, в которых по технологии производства возможно образование легковоспламеняемых и взрывоопасных концентраций смесей горючих газов и паров с воздухом и пылью. Разработкой взрывозащищенных двигателей занимаются в РУСЭЛПРОМ [119], АО «ЭЛДИН» [121] систем герметизации взрывозащищенных электродвигателей УГАТУ [45-47].

Степень защиты в таких двигателях применяют IP54 и выше. Защиту обеспечивает внешняя взрывонепроницаемая высокопрочная оболочка, выполненная из специального материала с применением технологии щелевой взрывозащиты. Корпус способен выдерживать внутри себя давление взрывного удара, не подвержен трещинообразованию и деформации под давлением и исключает проникновение взрыва во взрывоопасную окружающую среду. Взрывонепроницаемое соединение поверхностей частей оболочки корпуса выполняется так, чтобы через стык не смогли проникать горячие газы/пары при внутреннем взрыве. Для

этого применяется удлиненный щелевой зазор между внутренней крышкой подшипника и валом, удлиненное посадочное место подшипникового щита в корпус, увеличенный зазор между фланцами оболочки. Так при работе в условиях с возможностью появления рудничного метана безопасный зазор должен быть не менее 1 мм. Если осевого расстояния недостаточно для формирования взрывонепроницаемого зазора, то возможно использование лабиринтового сальника и «взрывонепроницаемое соединение» имеет извилистый путь прохождения через лабиринт. Взрывозащищенные электродвигатели могут быть значительной мощности с частотой вращения до 3000 об/мин с классом нагревостойкости изоляции до «Н» (180 °С). Температура возгорания газов и смесей определяет уровень их взрывоопасности. Температурный класс взрывозащищенных электродвигателей определяется предельной температурой, которую могут иметь поверхности электродвигателя при работе в среде газов с заданной температурой самовоспламенения, в предельном случае не выше 85°С. По области применения взрывозащищенные электродвигатели подразделяются по возможности работы во взрывоопасных зонах с присутствием рудничного газа (метана) и (или) горючей пыли, промышленных взрывоопасных смесей газов и взвесей (пропан, этилен, ацетилен, водород и др.), пылевых сред.

**Взрывобезопасные** асинхронные электродвигатели двигатели серии В в настоящее время заменяются взрывозащищенными двигателями, но эксплуатируются. Отличаются монтажными размерами от взрывозащищенных двигателей и предусматривают предотвращение выхода наружу взрыва, возникшего внутри оболочки путем его локализации.

**Искробезопасные** электродвигатели со степенью искробезопасности ExnA – «неискрящее оборудование», например, фирмы АВВ серий М2АА, М3АА, М3ААН, М3GP, М2ВА, фирмы Leroy-Somer серии FLSN (LSN), исключают возможность контакта искрообразующих или тепловыделяющих элементов с внешней средой с ограничением электрической и тепловой выделяемой энергии – с применением так называемой «искробезопасной электрической

цепи». Конструкция при обычных условиях работы должна предотвратить появление искры или электрической дуги и не допустить превышение установленной температуры на внутренних и внешних частях машины при работе, включая пуск и случай заторможенного ротора, при которых может достигаться температура самовозгорания окружающей взрывоопасной среды. Это обеспечивается, в частности: увеличенными путями утечек и зазорами между неподвижными и вращающимися частями с герметизацией в виде торцевого и/или радиального уплотнения. Форма, длина и величины зазоров в соединении узлов в отверстиях для вала должны быть такими, чтобы обеспечивалось дросселирование и охлаждение выходящих наружу газов. Оболочка двигателей предусматривает увеличенное расстояние по воздуху и поверхности между проводящими частями (утечки по поверхности), предотвращающие возникновение электрической дуги и искр между неподвижными и вращающимися частями. Аналогично и для двигателей с защитой от воспламенения горючей пыли DIP.

### Взрывозащищенные рудничные (шахтные) электродвигатели серий

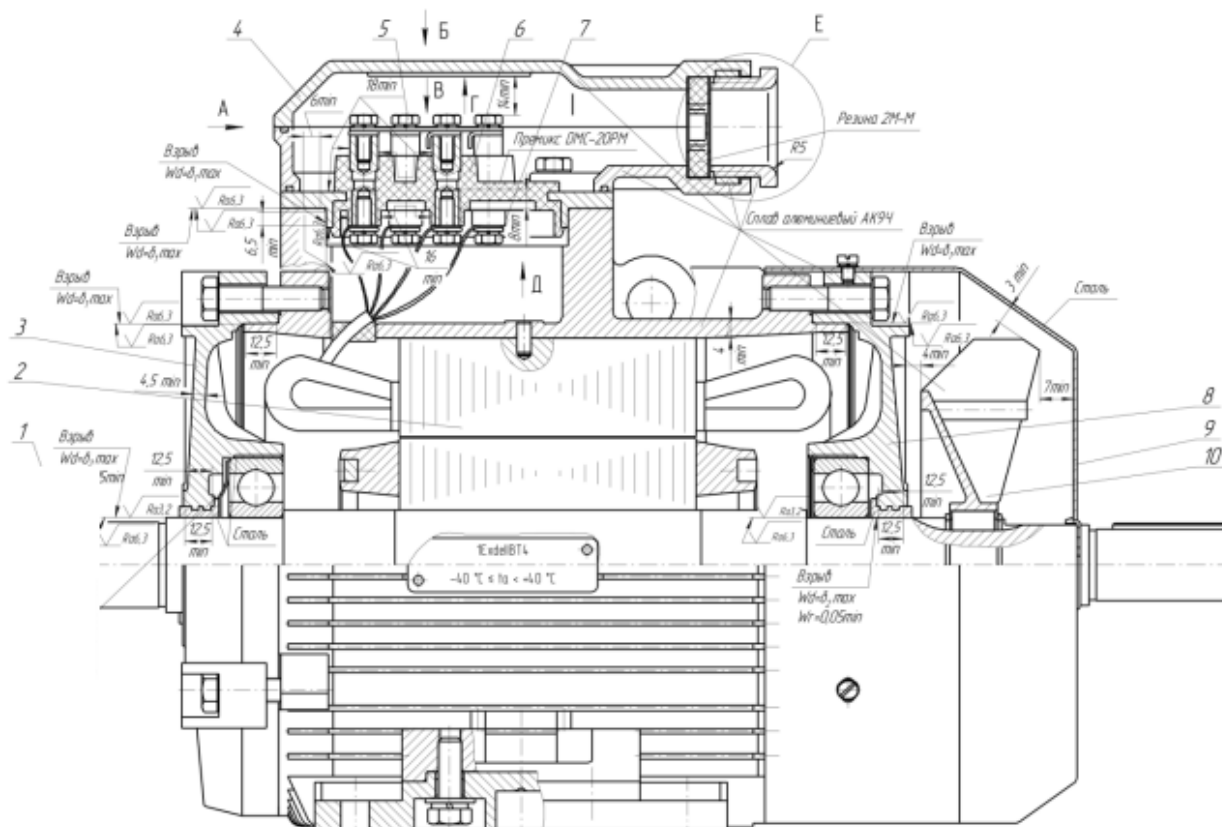


Рис. 1.4. Конструкция взрывозащищенного электродвигателя 4ВР



ВРА, ВРП, АВР, 1ВАОРВ, ЭКВК предназначены для привода механизмов в шахтах, а также в помещениях и наружных установках, опасных по загазованности метаном, повышенной угольной запыленности и загрязненности угольными частицами, повышенной температуры. В электродвигателях предусматриваются комбинированные герметизаторы вала, содержащие, например, в электродвигателе ЭКВК 4-220 шахтного комбайна маслозащиту с двойными войлочными и резиновыми армированными манжетными и лабиринтное уплотнения. Конструкция взрывозащищенного электродвигателя 4ВР представлена на рис. 1.4.

С течением времени из-за попадания твердых угольных частиц происходит изнашивание манжет и поверхности вала электродвигателя, масло попадает во внутреннюю полость электродвигателя на обмотку, снижается электрическая стойкость и долговечность изоляции, повышаются потери и нагрев обмотки. Это приводит к преждевременному выходу электродвигателя из строя. Разработкой взрывозащищенных рудничных двигателей занимаются в УкрНИИВЭ. По уровню взрывозащиты электродвигатели подразделяются на: рудничные нормальные электродвигатели (не взрывозащищенные) – РН; рудничные электродвигатели повышенной надежности - РП; рудничные взрывобезопасные электродвигатели - РВ; рудничные особо взрывобезопасные электродвигатели - РО. По виду взрывозащиты электродвигатели подразделяются на электродвигатели с взрывонепроницаемой оболочкой типов В, 1В, 2В, 3В.

**Электродвигатели насосов, тягодутьевых механизмов, механизмов топливоприготовления.** В качестве привода сетевых центробежных насосов цехов оборотного водоснабжения ТЭС, турбо- и поршневых компрессоров, тягодутьевых механизмов (дымососов, дутьевых вентиляторов), механизмов топливоприготовления на пылеугольных станциях (мельницы, мельничные вентиляторы, дробилки, мешалки и др.) применяются мощные электродвигатели типа АТД. Долговечность и надежность этих электродвигателей определяется качеством герметизации вала, исключающей попадание водяного тумана и масла на обмотки электродвигателей, проникновение пыли и абразивных частиц в зону герметизации, что снижает электрическую стойкость и долговечность изоляции.

**Электродвигатели, работающие при повышенном перепаде давлений между внешней средой и внутренним объемом электродвигателя.** Электродвигатели могут осуществлять ввод вращающего вала и передачу момента в замкнутый объем специальных установок с повышенным или пониженным давлением. В этих случаях могут применяться вакуумные уплотнения, способные удерживать большие перепады давлений, вплоть до вакуума. Например, манжетные герметизаторы с фторопластовыми уплотнениями.

**Частотно-регулируемые асинхронные взрывозащищенные электродвигатели.** Частотно-регулируемые электроприводы позволяют в зависимости от изменения режима работы установки в целях согласования с нагрузочной характеристикой обеспечивать регулирование частоты вращения и вращающего момента электродвигателя [2,8]. Это позволяет добиваться повышения эффективности работы установок, например, в случае частотно-регулируемого привода насосных установок с изменяемым напором. В особых условиях работы применяются взрывозащищенные частотно-регулируемые электродвигатели, например, серии 1ВАОЧР. При работе от преобразователя частоты (ПЧ) эти двигатели могут работать в двух диапазонах регулирования частоты вращения. Применяемые уплотнения в этих электродвигателях рассчитаны на работу в установленных режимах. При частых пусках, реверсах и остановках, изменении частоты вращения вала и режима работы целесообразны специальные системы герметизации. Таким образом в электродвигателях, работающих в различных режимах и условиях, в широком диапазоне внешних воздействий при регулировании частоты вращения вала, изменяемом перепаде давлений, повышенном температурном диапазоне целесообразны к применению герметизаторы с возможностью регулирования степени герметизации с изменением условий работы.

### 1.3. Применение магнитных жидкостей в электродвигателях, магнитожидкостные герметизаторы вращающихся валов

Магнитные жидкости (МЖ) (рис. 1.5) представляют собой коллоидные системы, состоящие из наноразмерных (10-40 нм) ферромагнитных частиц, покрытых поверхностно-активным веществом (ПАВ), препятствующим их агрегированию, диспергированных в жидкости-носителе.

МЖ – это искусственно созданная наносистема, обладающая одновременно текучестью и магнитными свойствами, что может эффективно использоваться в перспективных устройствах [5,7,9,44,74].

МЖ – это искусственно созданная наносистема, обладающая одновременно текучестью и магнитными свойствами, что может эффективно использоваться в перспективных устройствах [5,7,9,44,74].

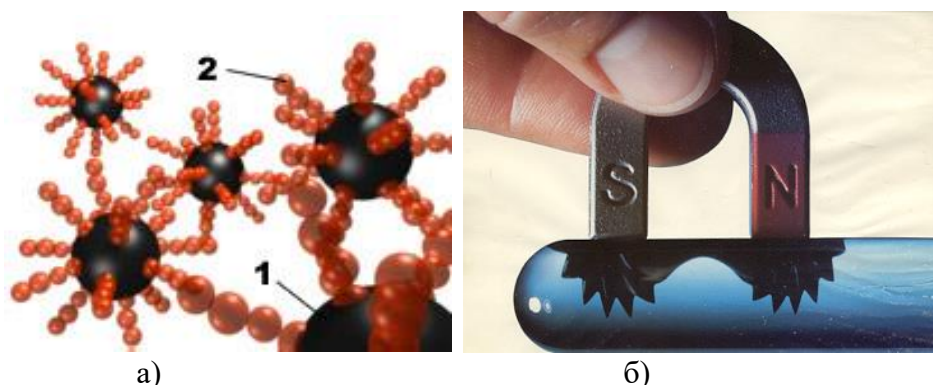


Рис. 1.5. Магнитная жидкость (а) содержит: ферромагнитные частицы (1) с ПАВ (2) в жидкости-носителе; воздействие магнита на МЖ (б)

Магнитная характеристика МЖ, как и у других ферромагнитных материалов, нелинейная с зоной насыщения, зависит от объемной концентрации ферромагнитных частиц  $C_V$  в МЖ и напряженности магнитного поля  $H$ . Магнитная характеристика в виде зависимости намагниченности  $M$  от  $H$  для одной из МЖ представлена на рисунке 1.6.

Относительная магнитная проницаемость МЖ может достигать 3 и при насыщении (напряженности более 300 кА/м) ненамного превышает  $\mu_0$ , намагниченность насыщения МЖ  $M_S$  - до (45-50) кА/м. Средняя  $H$  в зазоре составляет (0,3-0,5) МА/м, а  $M = M_S$ . Плотность  $\rho_{МЖ}$  составляет  $(1,0-1,7) \cdot 10^3$  г/см<sup>3</sup>. Теплоемкость МЖ  $C_Q \sim 1600$  Дж/(кг·°С), теплопроводность  $\lambda - 0,15$  Вт/(м·°С). В ИГЭУ синте-

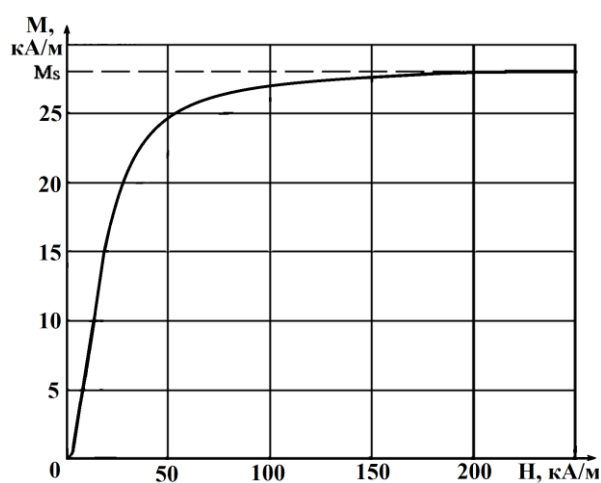


Рис. 1.6. Магнитная характеристика МЖ

Магнитная характеристика МЖ, как и у других ферромагнитных материалов, нелинейная с зоной насыщения, зависит от объемной концентрации ферромагнитных частиц  $C_V$  в МЖ и напряженности магнитного поля  $H$ . Магнитная характеристика в виде зависимости намагниченности  $M$  от  $H$  для одной из МЖ представлена на рисунке 1.6.

зированы качественные МЖ для разных устройств [118]. Известным зарубежным производителем МЖ является Ferrotec Corp. [123].

При низкой  $C_V$  и индукции магнитного поля  $B=0$  МЖ ведет как Ньютонская жидкость. При повышении  $C_V$  и  $B$  магнитные частицы в МЖ структурируются, усиливается структурное взаимодействие частиц. В этом случае МЖ обладает начальным напряжением сдвига  $\tau_0$  - течение МЖ начнется, если прикладываемое к МЖ напряжение сдвига  $\tau$  станет больше  $\tau_0$ . МЖ введет себя, как псевдопластичное тело с динамической вязкостью МЖ  $\eta$ , зависящей от скорости сдвига  $\gamma = dv/dy$ ,  $\tau = \eta\gamma$ . МЖ тем сильнее отличается от Ньютонской жидкости, чем меньше  $\gamma$ , больше  $C_V$  и выше  $B$ . Возрастание  $\gamma$  от состояния покоя разрушает структуры магнитных частиц в МЖ, уменьшает  $\tau$  и  $\eta$  (рис. 1.7), МЖ приближается к Ньютонской жидкости с  $\eta = \text{const}$ . МЖ представляется псевдопластическим материалом. Шероховатость поверхности, соприкасающейся с движущейся МЖ, увеличивает  $\eta$  в приповерхностном слое.

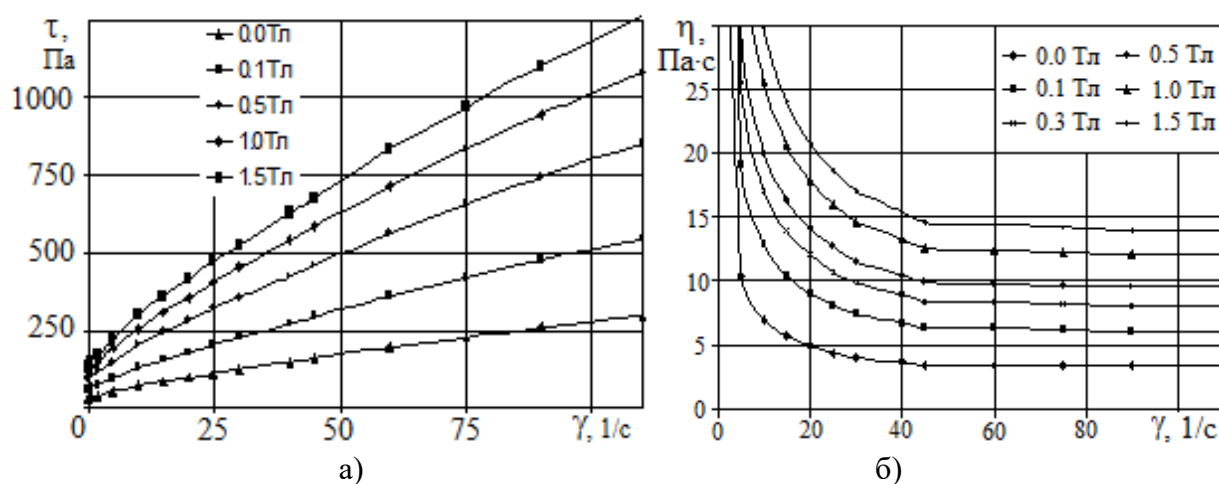


Рис. 1.7. Магнитореологические (а) и магнитовязкостные (б) характеристики МЖ

С ростом  $T_{MЖ}$  уменьшаются  $\tau_0$ ,  $\tau$  и  $\eta$ . В таблице 1.2 приведены температурные зависимости вязкости некоторых МЖ. Таким образом  $\eta = f(\gamma, B, T)$ .

**Таблица 1.2.** Температурная зависимость вязкости МЖ

Намагниченность насыщения, кА/м	Вязкость пластическая МЖ (Па·с) при температурах								
	50 °С	40 °С	30 °С	20 °С	10 °С	0 °С	-10 °С	-20 °С	-30 °С
31(МКС 350-30)	0,692	0,897	1,125	1,577	2,853	4,422	6,831	11,147	19,083
40(МКС 009-40)	0,071	0,083	0,098	0,135	0,169	0,238	0,324	0,635	1,118
41(МКУ 100-40)	0,302	0,457	0,724	1,323	2,592	5,784	13,712	36,724	–

Электромеханические устройства с использованием МЖ описаны учеными МЭИ [35], МАИ [68], ИГЭУ [24,42]. Для взрывозащищенных тяговых электродвигателей применяется феррожидкостная система охлаждения [39]. Использование МЖ при охлаждении лобовой части обмотки статора АД позволяет снизить их нагрев до 10 °С [7]. При этом конвективное течение МЖ в электродвигателе дополнительно интенсифицируется вращающим магнитным полем статора.

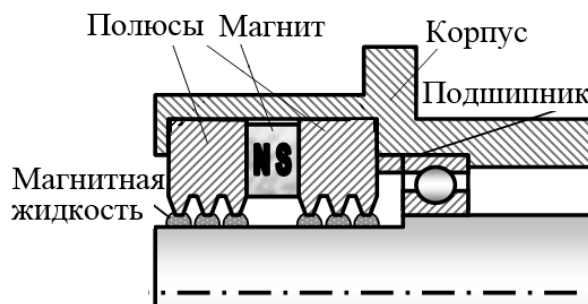


Рис. 1.8. Радиальный магнитожидкостный герметизатор

Известны погружные электродвигатели полностью заполненные маловязкой МЖ [74], что позволяет снизить перегревы и намагничивающий ток до 39 %, повысить коэффициент мощности. Но лобовое рассеяние возрастает до 4 раз, что снижает пусковой и максимальный моменты. Одновременно существенно увеличиваются вязкостные потери в МЖ в зазоре. Применение МЖ эффективно в электротехнических системах виброзащиты с магнитореологическим демпфером [23], в активной подвеске транспортных средств с магнитореологическим амортизатором с регулируемой жесткостью (СамГТУ) [1], при электромагнитной магнитожидкостной сепарации немагнитных материалов (ИГЭУ) [28], в электромеханическом преобразователе с управляемым движением ферромагнитных частиц в нефти (НПИ), при магнитожидкостной смазке в двигателе-маховике (ВНИИЭМ) [21,48].

В качестве герметизаторов валов наибольшее распространение получили радиальные цилиндрические (рис. 1.8) магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) с МЖ в зазоре между вращающимся валом и неподвижной магнитной си-

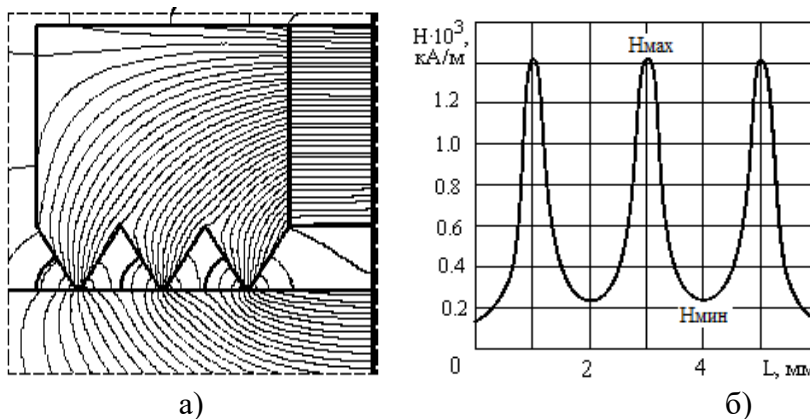


Рис. 1.9. Распределение линий магнитного потока в МЖГ (а) и напряженности магнитного поля в зазоре (б)

стемой. Стальные полюсы и магнит имеют кольцеобразную форму и охватывают вал. Зазор составляет  $\delta=0.1-0.25$  мм, радиусы уплотняемых валов МЖГ достигают 250 мм, отношение шага зубцового деления к зазору может достигать 20. МЖ удерживается в зазоре магнитным полем, чаще всего, магнита. На рисунке 1.9 представлено типичное распределение линий магнитного потока и  $H$  в зазоре МЖГ. Зубцовая структура полюсных наконечников формирует неоднородное распределение магнитного поля в зазоре с максимальной напряженностью под зубцом –  $H_{\max}$  и минимальной между зубцами –  $H_{\min}$ . Часть магнитного потока магнита замыкается по наружному корпусу, который при осевом магните делают немагнитным [64]. МЖГ могут быть возвратно-поступательного действия [78].

Магнитные силы, действующие на ферромагнитные частицы МЖ, направлены в сторону  $H_{\max}$  и втягивают МЖ. МЖ, являясь своеобразным жидким сальником, заполняет зазор с образованием пробки из МЖ, герметизирует вал и разделяет области, возможно, с разными средами и давлениями. При отличающихся давлениях в областях по разные стороны МЖ пробки воздействующий на МЖ внешний перепад давлений

$\Delta p_{\text{внеш}}$  изменяет ее положение, стремясь выдавить из зазора. В результате изменения положения МЖ возникают магнитные силы, стремящиеся вернуть МЖ в такое положение, которое она занимала бы при отсутствии  $\Delta p_{\text{внеш}}$ . Таким образом  $\Delta p_{\text{внеш}}$  компенсируется,

вследствие измененного положения МЖ, магнитным давлением в МЖ и результате МЖГ удерживает  $\Delta p_{\text{внеш}}$ . При возрастании  $\Delta p_{\text{внеш}}$  положение МЖ изменяется до критического положения, после чего происходит пробой МЖГ (рис. 1.10) [43,97,106]. Удерживаемый перепад давлений зубцом МЖГ в статическом режиме определяется [44,69,83] из уравнения Бернулли

$$p_{\text{ст.МЖГ}} = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH . \quad (1.1)$$

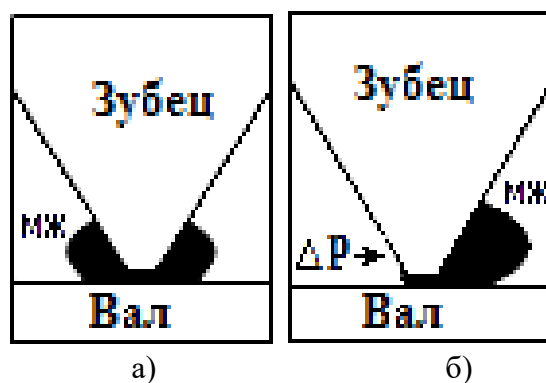


Рис. 1.10. Положение МЖ при отсутствии перепада давлений (а) и критическое положение МЖ при воздействии максимального перепада давлений (б)

Здесь  $H_1$  – напряженность магнитного поля в точке 1 на поверхности МЖ обращенной к области с меньшим давлением;  $H_2$  - в точке 2 на поверхности МЖ обращенной к области с большим давлением. При нулевом перепаде давлений  $H_1 = H_2$ . При критическом перепаде давлений  $H_1 = H_{\text{мин}}$ ,  $H_2 = H_{\text{мах}}$ .

При использовании в МЖГ современных постоянных магнитов напряженность магнитного поля в зазоре МЖГ достигает  $10^6$  А/м, МЖ находится в состоянии насыщения с намагниченностью  $M_s$ . МЖГ можно рассматривать как электромагнитный аппарат [77]. Работоспособность МЖГ зависит от корректности разработки и исследования [82,91,93, 94,104,105,107], способа транспортировки и заправки МЖ в МЖГ [101].

В МЖГ может быть достигнута практически абсолютная герметичность (натекание по гелию до  $10^{-12}$  м<sup>3</sup> Па/с), высокий удерживаемый  $\Delta p_{\text{внеш}}$  (до 7 Атм), повышенная долговечность (наработка на отказ до 90 тыс. часов). Вследствие жидкостного трения в МЖГ малы момент сопротивления вращению и собственные потери, отсутствует износ вала. Из-за удержания МЖ магнитным полем мала скорость ее утечки. МЖГ работают при ударных нагрузках, вибрационных воздействиях, знакопеременных давлениях, обладают смачиваемостью поверхностей, радиационной стойкостью, «самозалечиванием» после пробоя, не требуют смазки, способны выталкивать из себя немагнитные твердые частицы и влагу, работоспособны в условиях запыленности, водяного тумана, в стояночном и динамическом режимах, при хранении на складе, в широком температурном диапазоне в летнее и зимнее время, могут быть ориентированы в разных пространственных положениях. Преимущества МЖГ перед сальниковыми и манжетными уплотнениями заключаются в лучшей герметизирующей способности, отсутствии механического контакта с валом, увеличении межремонтного периода, долговечности. На космической орбитальной станции «МИР» МЖГ обеспечивали вакуумное уплотнение валов более 10 лет.

МЖГ используются в энергетическом оборудовании ТЭС для герметизации ввода охлаждающих сред, водорода; привода насосов [92,96], компрессорах [98]; в аэрохолодильниках с орошением теплообменников; газоперекачивающих

агрегатах; для сохранения вакуума в инерционных кинетических накопителях энергии; в космической и авиационной технике; в вакуумных вводах при передаче движения в вакуумные среды установок металлизации, при вакуумной плавке металлов, вакуумно-плазменном напылении, в технологических лазерах, вакуумных насосах [95]; для герметизации паров гелия и азота в устройствах со сверхпроводниками; в химических и биологических реакторах, ферментаторах, обеспечивая стерильность синтеза и исключая утечки химически вредных и агрессивных веществ, вирусов и биологических культур; в оптическом приборостроении для исключения запотевания и запыления систем ночного и видео наблюдения; в высокоточном оборудовании при работе систем с микронными зазорами [111], предотвращая попадания пыли, влаги, агрессивных паров в рабочую зону; исключения загрязнения производственных помещений, окружающей среды, обеспечивая выполнение требований санитарных норм.

В ИГЭУ, СКТБ «Полюс» и ПНИЛ прикладной феррогидродинамики под руководством Д.В. Орлова была сформирована научная школа по исследованиям и разработкам МЖГ. Исследования проводили д.т.н. Щелькалов Ю.Я., Казаков Ю.Б., Михалев Ю.О., Сизов А.П., Полетаев В.А.; к.т.н. Страдомский Ю.И., Морозов Н.А., Перминов С.М., Сайкин М.С. и др. Применение МЖГ для повышения безопасности устройств исследуется в ИПСА ГПС МЧС России (Иваново).

Уточненные исследования свойств и характеристик МЖГ проводятся в БНТУ (г. Минск, Белоруссия) Баштовым В.Г. [5,6], Краковым М.С. [37,38,88,90]. Обширные исследования и разработки МЖГ выполнены Радионовым А.В. (НПВП «Феррогидродинамика», г. Николаев, Украина) [60-63,117,102,103].

Среди Российских производителей МЖГ для ответственных установок следует отметить разработки ООО «ИнТекТехно» [40,116], КБ «АПЕРОН» [113], ООО «ВИНД» [115]. Значимым зарубежным разработчиком и производителем МЖГ является Ferrotec [122]. МЖГ устанавливаются в Российских взрывозащищенных электродвигателях серий ВАСО, АСВО, ВАСВ, ВА, ВАБ, ВРА, ВРАБ; в зарубежных электродвигателях ТПКК 22 кВт и MLA 25 кВт производства Япо-



нии; JSNF/MJUL производства Франции; ENGV и AWM-7110 производства Чехии; 180L/4A-34 производства Италии и др. В таблице 1.3 приведены типы электродвигателей с установленными МЖГ и предприятия их выпускающие.

**Таблица 1.3.** Электродвигатели с МЖГ и предприятия их выпускающие

Предприятия по выпуску электродвигателей с МЖГ	Типы электродвигателей
ОАО ХК «Привод» (ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ-ПРИВОД) [114]	ВАСВ-200, ВАСО 2-75-24, ВАСО 2-37-24, ВАСО 2-55-24, ВАСО 4-37-24, ВАСО 4-22-24, ВАСО 4-30-24
АО «Завод крупных электрических машин» (ранее ПО «ЮЖЭЛЕКТРОМАШ») [112].	ВАСО (АСВО) 15-23-34 и АСВО 5К-75-34 вентиляторов градирен ВГ-70, ВАСО 14-16-32 вентиляторов градирен ВГ-50, ВАСО 16-34-24 (ВАСО 16-29-24), ВАСВ 17-40-52 (выводимый ВАСВ 16-20-40), ВАСВ 14-34-24, ВАСО5К-24
ОАО "Сафоновский электромашиностроительный завод» (ОАО «СЭЗ») [119]	2АСВО 710 и 3АСВО 710 вентиляторов градирен ВГ-70
Научно-Производственное ЗАО «Электромаш»	ВАСО 2-37-14 (ВАСО 2-22-14, ВАСО 2-30-14), ВАСО 4-37-24, ВАСО 2-75-24 (ВАСО 2-37-24, ВАСО 2-55-24)
Ярославский электромашиностроительный завод «ЭЛДИН» [121].	ВА100-355, ВАБ200-450, ВРА, ВРАБ 200-225 мощностью до 500 кВт
ОАО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса»	ВАСО5П мощностью до 800 кВт для угольной, горношахтной, химической, нефтеперерабатывающей, газовой промышленности со взрывоопасной средой.

МЖГ в электродвигателях устанавливаются взамен неудовлетворительно работающих штатных уплотнений в выносных подшипниковых узлах, подшипниковых щитах и даже подшипниковых крышках (рис. 1.11) взрывозащищенных, искробезопасных, рудничных электродвигателей, электродвигателей градирен и аппаратов воздушного охлаждения, насосов, тягодутьевых механизмов, механизмов топливоприготовления, работающих при повышенном перепаде давлений, в присутствии вредных и агрессивных веществ, легковоспламеняемых и взрывоопасных концентраций смесей горючих газов и паров, загрязненности пылью и твердыми частицами, повышенной температуры, капельных брызг и мелкодисперсной влаги, водяного тумана, что увлажняет и загрязняет обмотки электродвигателя, снижает сопротивление изоляции, сокращает срок



Рис.1.11. МЖГ в подшипниковой крышке

службы подшипников, приводит к ускоренному износу вала.

Герметизаторы в таких установках часто выполняются комбинированными [67,72,76], где в качестве первой ступени выступает контактное уплотнение, а в качестве второй – МЖГ. МЖГ эффективно применено во взрывазащищенном электродвигателе ВАО-630 для привода компрессора производства аммиака [60,61], в электродвигателях 2АСВО (рис. 1.12), мощных синхронных электродвигателях СДН и СТД мощностью для защиты подшипниковых узлов привода насосов и компрессоров. Так как МЖГ способно выталкивать из себя попадающие немагнитные частицы, то МЖГ эффективно работают в электродвигателях в условиях сильной запыленности, при уплотнении сыпучих материалов. МЖГ предотвращает попадание абразивной пыли в подшипниковые узлы электродвигателей, износ валов. Разработаны и эффективно применены МЖГ на электроприводах шахтных комбайнов (рис. 1.13). МЖГ вала рудничного электродвигателя ЭКВК 4-220 шахтного комбайна (рис. 1.14) размещен в подшипниковом щите на месте штатного лабиринтного уплотнения при сохранении манжетных уплотнений. Применение МЖГ позволяет увеличить срок службы подшипников электродвигателей, сохранить надежность изоляции обмотки, повысить межремонтный период работы, сократить



Рис. 1.12. МЖГ двигателя 2АСВО

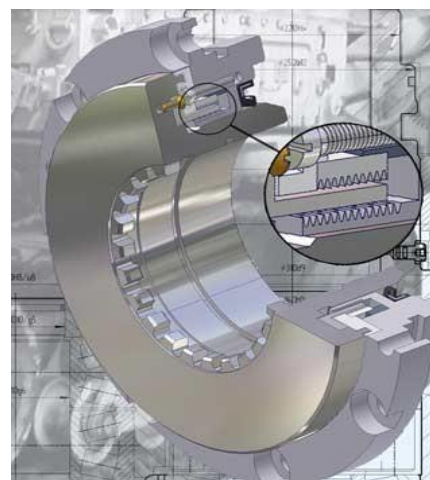


Рис. 1.13. МЖГ двигателя шахтного комбайна

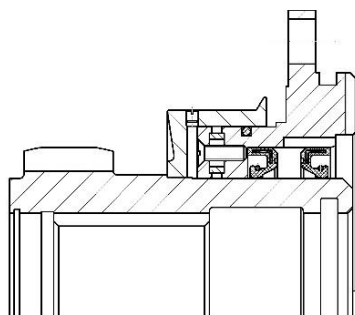


Рис. 1.14. Герметизация рудничного электродвигателя ЭКВК 4-220 с применением МЖГ и манжетных уплотнений

число капитальных ремонтов, снизить их стоимость.

С применением МЖГ возможно более чем в 1,5 раза повысить ресурс специальных электродвигателей, работающих в особых условиях. Несмотря на то, что применение МЖГ увеличивает стоимость электродвигателя до 10 %, но одновременно до 2 раз сокращаются эксплуатационные расходы, так как потери на жидкостное трение в МЖГ на два порядка меньше потерь на трение в сальниковых или манжетных уплотнениях.

В таблице 1.4 приведены предприятия выпускающие МЖ и МЖГ.

**Таблица 1.4.** Производство МЖ и МЖГ для электродвигателей

<b>Организации по производству МЖ и МЖГ для электродвигателей</b>	
ООО "Научно-производственное внедренческое предприятие «Феррогидродинамика» [117]	МЖ и МЖГ для электродвигателей ВАСО, ВАСО <sub>2</sub> , ВАСО <sub>4</sub> , 2АСВО, ВАСВ, СТД, СДН, ГЕК-42585, ТИКК (Япония), JSNF/MJUL (Франция), ENGV-250 и АWM-7110 (Чехия), 180L/4A-34 (Италия)
ООО «ВИНД» [115]	МЖ и МЖГ для электродвигателей ВАСВ, ВАСО, 2АСВО
КБ «АПЕРОН» [113]	МЖГ для электродвигателей 2АСВО и 3АСВО
ООО «ИнТек Техно» [116]	МЖГ для ЭД при Т от -60°С до 150°С; до 15000 об/мин
ООО «Техномаг», ИГЭУ	Изготовление МЖГ на диаметры вала 40, 50, 65, 110 мм для электродвигателей Ярославского завода «ЭЛДИН»

Повышение надежности работы и, как следствие, безопасной эксплуатации специальных электродвигателей, увеличение срока службы приводит к большему экономическому эффекту чем, например, повышение КПД электродвигателей. В работе [60] выполнена оценка техногенного риска R электродвигателей ВАСО с сальниковыми уплотнениями и с МЖГ для режимов продолжительной работы S1, кратковременной работы S2 и повторно-кратковременной работы S3 (рис. 1.15). Техногенный риск электродвигателей с сальниковыми уплотнениями повышается при переходе от режима работы электродвигателя S1 к режиму работы S2 и еще больше при переходе к режиму работы S3. Техногенный риск электродвигателей с МЖГ одинаков для всех режимов работы так как МЖГ обеспечивает полную герметичность во всех режимах. Показано, что замена сальникового уплотнения на МЖГ позволяет снизить техногенный риск уплотнительной системы в 4-7 раз. Техногенный риск возрастает, на примере трех регионов, при снижении среднегодовой температуры окружающей среды.

Режимы работы электродвигателей от ПЧ характеризуются частыми пусками и реверсами, сопровождаются тепловыми, коммутационными и механическими воздействиями на обмотку и механическими на подшипники. Снижение техногенного риска АД серии ВАСО, работающих от ПЧ, при использовании МЖГ [63] сопровождается смещением частоты повреждаемости от подшипниковых узлов к обмотке статора при общем снижении повреждений в целом.

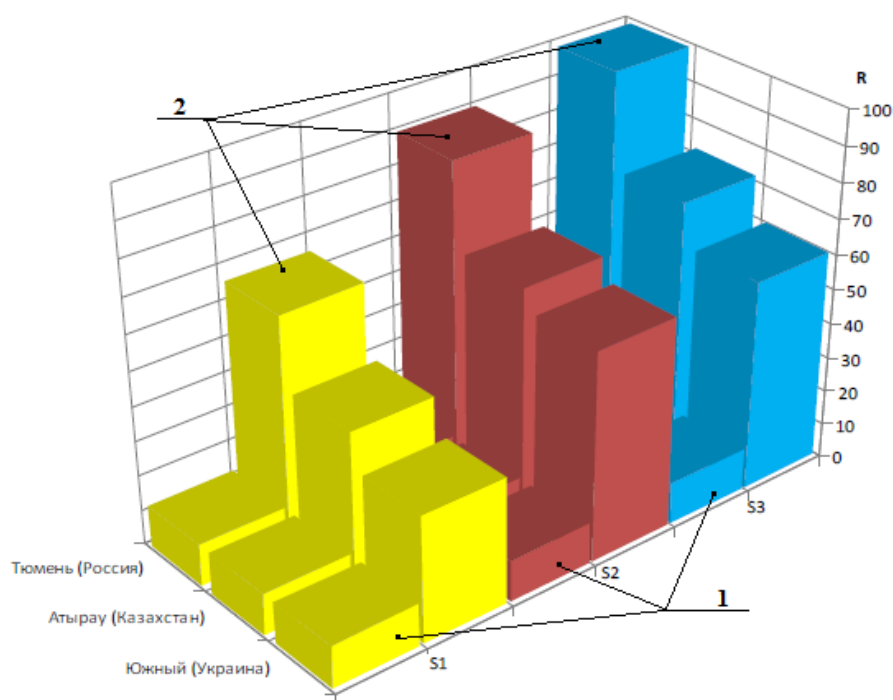


Рис. 1.15. Оценка техногенного риска в АД с МЖУ (1) и с сальниковыми уплотнениями (2) в режимах S1, S2 и S3

Исследованиями [38,88,102,103] показано, что термомагнитная конвекция при высоких линейных скоростях движения МЖ в зазоре приводит к интенсивному течению МЖ под зубцом, снижая в этой области температуру МЖ. Основной проблемой является создание такого магнитного поля в зазоре МЖГ, чтобы магнитные силы превышали центробежные силы и удерживали МЖ в зазоре.

#### 1.4. Особенности магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей

Широкое применение МЖГ в специальных регулируемых электродвигателях, работающих в особых условиях, сдерживается несколькими обстоятельствами. МЖГ эффективно функционирует в определенном диапазоне линейных скоростей МЖ, определяемых диаметром и частотой вращения вала. Крайние случаи – очень большая и нулевая линейные скорости МЖ в МЖГ электродвигателя, негативно сказываются на эффективности работы МЖГ [81,108,110].

В МЖГ неподвижного в течение длительного время вала, например, при длительном останове электродвигателя или хранении его на складе, в условиях значительного магнитного потока в неподвижной МЖ начинается фильтрация жидкости-носителя в область минимальной напряженности магнитного поля и концентрации наноразмерных ферромагнитных частиц в области максимальной напряженности магнитного поля. Происходит расслоение МЖ и потеря возможности МЖГ удерживать перепад давлений. Перераспределение магнитных частиц в МЖ увеличивается со временем покоя и градиента напряженности магнитного поля. Необходимо предусматривать работу МЖГ в таком режиме.

В другом случае, при очень большой скорости вращения вала, и увлекаемой во вращение МЖ, на МЖ действуют большие центробежные силы, стремящиеся оторвать ее от вращающегося вала. Ослабляется контакт МЖ с валом. Для МЖГ рекомендуется [44] ограничение по предельной линейной скорости МЖ на поверхности вала  $v_{\text{МЖ}} < 10$  м/с. Для двигателя с частотой вращения  $n = 3000$  об/мин это ограничение дает максимально допустимый диаметр вала

$$D_{\text{max}} \leq 60v_{\text{МЖ}}/(\pi n) = 63,7 \text{ мм.} \quad (1.2)$$

Такой диаметр вала ограничивает максимальный вращающий момент или мощность электродвигателя при заданной частоте вращения. Например, в [115] приводятся данные по МЖГ с учетом взаимоувязки мощностей ЭД, частот вращения вала и диаметров валов (табл. 1.5). При  $v_{\text{МЖ}} < 10$  м/с изменение удерживаемого перепада давлений, связанное с центробежными эффектами, незначительно. При  $v_{\text{МЖ}} > 10$  м/с (рис. 1.16) снижается удерживаемый перепад давлений. Одновременно при повышении частоты вращения электродвигателя и, соответственно, скорости сдвига слоев МЖ и  $v_{\text{МЖ}}$ , квадратично возрастают вязкостные потери в МЖ, происходит интенсивный ее разогрев, возможно даже ее вскипание при температуре (130-150) °С, испарение и/или коагуляция, потеря герметизирующих свойств. Воздействие магнитного поля несколько замедляет испаряемость МЖ. При  $v_{\text{МЖ}} > (20-25)$  м/с начинается вихреобразование в МЖ, течение МЖ переходит из ламинарного в турбулентное, что ведет к возрастанию вязкостного трения, момента трения и потерь в МЖГ.

**Таблица 1.5.** МЖГ валов электродвигателей с взаимоувязкой мощностей, частот вращения вала и диаметров валов

Тип электродвигателя	Мощность, кВт	Частота вращения вала, об/мин	Диаметр вала, мм
ВАСО 2	37, 55, 75	250	120
ВАСВ 14-16-32	30	178	95
ВАСО 14-16-32	30	178	140
ВАСО 14-34-24	100	250	105
ВАСО 15-23-34	75	170	126
ВАСВ 15-23-34	75	170	126
ВАСВ 16-20-40	75	145	130
ВАСО 16-34-24	90	250	105
ВАСО 37-14	20, 22, 30, 37	428	95
2 АСВО 710	30, 75	187, 176	140

Однако интенсивность теплоотдачи от МЖ к корпусу МЖГ при этом несколько увеличивается за счет перемешивания МЖ. При  $v_{\text{МЖ}} > 50$  м/с может начинаться отрыв МЖ от поверхности вала с нарушением целостности МЖ пробки.  $v_{\text{МЖ}} = 70-80$  м/с - предельные линейные скорости движения МЖ для МЖГ.

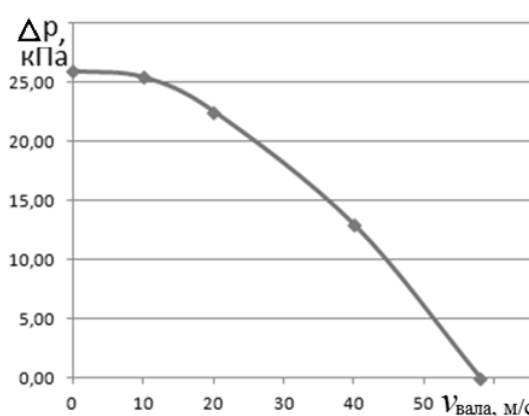


Рис. 1.16. Удерживаемый перепад давлений МЖГ при изменении линейной скорости на валу

Для повышения герметичности высокоскоростных МЖГ в [7] предложены конструкции МЖГ с зубцовыми концентраторами магнитного потока на валу и гладкими поверхностями полюсных приставок. Стабилизирующий эффект зубцов на вале объясняется подтягиванием МЖ центробежными силами к вершине

зубца, что препятствует снижению удерживаемого давления при возрастании частоты вращения вала. Вектор центробежной силы в такой конструкции противоположен направлению градиенту магнитного поля, что частично компенсирует действие центробежных сил на МЖ. Возможно до 2 раз повышение  $\Delta p$ , по сравнению с  $\Delta p$  при неподвижном вале. При дальнейшем повышении частоты вращения вала  $\Delta p$  начинает снижаться. Отрыв МЖ от вала происходит при значительно большей  $v_{\text{МЖ}}$  [43] (рис. 1.17). Дополнительное повышение удерживаемого перепада давлений при увеличении  $v_{\text{МЖ}}$  может дать размещение полюсных магнитов на вращающемся валу, но это связано с конструктивным усложнением. Рассмотренные конструкции не предусматривают регулирование свойств МЖГ. Кроме того, выполнение зубцов и размещение полюсов на валу не всегда может быть приемлемым.

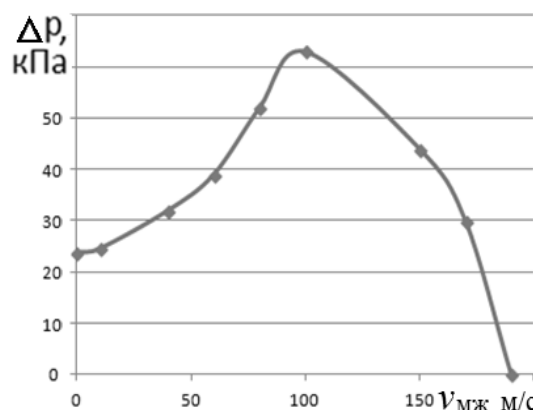


Рис. 1.17. Удерживаемый перепад давлений МЖГ с зубцами на валу

Эти обстоятельства сдерживают применение МЖГ в электродвигателях частотно-регулируемых приводов при повышении частоты вращения вала, изменении вращающего момента. В то же время для электромашиностроительных заводов, например, ООО «Электротяжмаш-Привод», «ЭЛДИН» и др., важна применимость МЖГ в регулируемых электродвигателях.

Применяемые конструкции МЖГ рассчитаны на работу в установившихся режимах. Работа МЖГ в ненормальных режимах (при изменении частоты вращения вала, реверсе, останове, в повторно-кратковременных режимах, с изменяемым перепадом давлений, в ненормальных температурных условиях) имеет ряд особенностей, ранее не учитываемых. Применение частотных электроприводов вызывает необходимость исследования работы МЖГ регулируемых электродвигателей. При изменении режима работы и частоты вращения электродвигателя целесообразна настройка характеристик МЖГ на условия работы, регулирование системы герметизации.

В традиционных конструкциях МЖГ используются постоянные магниты, для них трудно осуществлять изменение магнитного потока, что затрудняет настройку свойств и эффективности работы МЖГ при изменении условий работы. В отдельных конструктивных решениях предлагается использовать в МЖГ дополнительную обмотку и путем изменения тока в ней регулировать интенсивность магнитного поля в зазоре МЖГ в зависимости или от частоты вращения [3] или от перепада давлений [4]. Однако системного решения с выработкой функциональных схем, моделей, разработкой алгоритмов и программ управления не предложено. Нет контроля разогрева МЖ, не исключено вытекание МЖ из зазора при останове вала из-за отсутствия наведенной ЭДС и тока в обмотке.

В электродвигателях с необходимостью обеспечения повышенной степени герметизации, например, взрывозащищенных, в целях повышения прочности корпуса подшипниковые щиты обычно выполняют стальными, что сопровождается их хорошими магнитопроводящими свойствами. Торцевой магнитный поток рассеяния Фб от токов в лобовых частях обмоток статора и ротора электродвигателя будет замыкаться по подшипниковому щиту, валу, проникать в МЖГ и накладываться на магнитные потоки МЖГ, воздействовать на свойства МЖГ. Фб зависит от нагрузки электродвигателя – изменение нагрузки вызывает изменение тока в обмотках электродвигателя и, соответственно, изменение Фб. Поэтому работу МЖГ в таких электродвигателях необходимо рассматривать с учетом электромагнитных процессов в самом электродвигателе.

### **1.5. Выводы и постановка задач исследований**

1. В системах привода установок, работающих в особых условиях: во взрывоопасных и загрязненных зонах; при воздействии агрессивных и абразивных сред; повышенном перепаде давлений, влажности и температуры; применяются специальные электродвигатели с повышенной степенью герметизации: взрывозащищенные, взрыво- и искробезопасные, рудничные, шахтные и др. Безопасная эксплуатация таких электродвигателей определяется их безаварийной работой.

2. Механические уплотнения вращающихся выходных валов специальных



электродвигателей, работающих в особых условиях, не всегда обеспечивают достаточную степень герметизации для безопасной эксплуатации электродвигателей. Техногенный риск работы электродвигателей с сальниковыми уплотнениями повышается при переходе от режима продолжительной работы к кратковременному и еще больше при переходе к повторно-кратковременному режиму.

3. Для обеспечения безопасной эксплуатации специальных электродвигателей, работающих в особых условиях, целесообразно применение герметизаторы с повышенной степенью герметизации и высокими эксплуатационными показателями, например, магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ). МЖГ способны обеспечить практически абсолютную герметичность - непроницаемость в/из электродвигателя газов, паров, жидкостей и взвесей; высокий удерживаемый перепад давлений. Вследствие жидкостного трения малы момент сопротивления и собственные потери. Из-за удержания МЖ магнитным полем мала скорость ее утечки из зоны герметизации. МЖГ способны работать при вибрационных воздействиях, ударных нагрузках и знакопеременных давлениях, обладают смачиваемостью поверхностей, радиационной стойкостью, «самозалечиванием» после пробоя, не требуют смазки, способны выталкивать из себя пыль, влагу и немагнитные частицы, вследствие чего снижается износ вала. МЖГ работоспособны в условиях запыленности, водяного тумана, в стояночном и динамическом режимах, при изменении температур, с разной пространственной ориентацией, имеют повышенный ресурс работы. Замена сальникового уплотнения на МЖГ позволяет снизить техногенный риск уплотнительной системы в 4-7 раз.

4. Широкое применение МЖГ в регулируемых электродвигателях сдерживается предельной окружной скоростью МЖ на валу, что ограничивает частоту вращения вала при его заданном диаметре (или диаметр вала при заданной частоте вращения), что в свою очередь ограничивает максимальный вращающий момент и мощность электродвигателя при заданной частоте вращения. При повышении частоты вращения электродвигателя и, соответственно, скорости сдвига слоев МЖ, квадратично возрастают вязкостные потери в МЖ, происходит ее разогрев и при предельной температуре потеря герметизирующих свойств

МЖГ. Целесообразна разработка и исследование усовершенствованных конструкций МЖГ регулируемых электродвигателей.

5. Применяемые МЖГ рассчитаны на работу в установившихся режимах. Работа электродвигателей от ПЧ сопровождается изменением частоты вращения, тепловых и механических воздействий. Работа МЖГ в ненормальных режимах (изменение перепада давлений, частоты вращения вала, останов, повторно-кратковременный режим, ненормальные температурные условия) имеет ряд особенностей, ранее не учитываемых. Применение в электроприводах регулируемых электродвигателей вызывает необходимость исследования работы МЖГ при изменении режима работы и внешних воздействий.

5. Работу МЖГ в электродвигателях с магнитопроводящими подшипниковыми щитами необходимо рассматривать системно с учетом электромагнитных процессов в самом электродвигателе, так как торцевой магнитный поток рассеяния лобовых частей обмоток, который зависит от нагрузки электродвигателя, будет замыкаться по подшипниковому щиту, валу, проникать в МЖГ и накладываться на магнитный поток МЖГ.

6. В ряде устройств с МЖ (магнитореологические демпферы, амортизаторы, электромагнитные магнитожидкостные сепараторы немагнитных материалов и др.) осуществляется управление свойствами МЖ изменением воздействующего магнитного поля. Таким же образом целесообразно регулирование свойств герметизации, настройка МЖГ на условия работы электродвигателя.

7. В МЖГ используются постоянные магниты с трудно осуществляемым изменением магнитного потока. В отдельных вариантах МЖГ предлагаются частные решения с использованием в МЖГ дополнительной обмотки и путем изменения тока в ней регулирование магнитного потока в МЖГ в зависимости или от частоты вращения или перепада давлений. Однако к настоящему времени системного решения с выработкой функциональных схем, моделей, разработкой алгоритмов и программ управления не предложено. Нет контроля разогрева МЖ, вытекания МЖ при останове вала.

8. Для повышения безопасной эксплуатации регулируемых электродвигателей, работающих в особых условиях с изменяемым режимом работы, целесообразна разработка и исследование электротехнической системы магнитоэластичной герметизации валов электродвигателя с возможностью управления свойствами системы в зависимости от условий эксплуатации. Применение электротехнической системы позволит производить управление и настройку характеристик МЖГ на условия работы: критического удерживаемого перепада давлений; предельной частоты вращения вала при сохранении работоспособности; предельной температуры МЖ; момента трения.

Из проведенного анализа следует, что разработка, исследование и применение управляемой электротехнической системы магнитоэластичной герметизации валов в целях повышения эффективности герметизации регулируемых электродвигателей за счет адаптируемости уплотнительной системы к изменению внешних воздействий и режимов работы для безопасной эксплуатации электродвигателей в различных режимах и условиях, при разнообразных внешних воздействиях, представляет актуальную научно-техническую задачу.

Для ее решения необходимо:

- разработать электротехническую систему управляемой магнитоэластичной герметизации валов регулируемых электродвигателей с повышенной эффективностью уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы для безопасной эксплуатации электродвигателей;

- выбрать способ и средства управления, обосновать условия регулирования, разработать алгоритм и программу управления, имитационные модели электротехнической системы магнитоэластичной герметизации;

- выполнить уточненное моделирование компонентов и расчетные исследования свойств электротехнической системы магнитоэластичной герметизации валов регулируемых электродвигателей;

- осуществить практическую реализацию и провести экспериментальные исследования системы магнитоэластичной герметизации валов регулируемых электродвигателей в различных режимах.

## 2. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЯЕМОЙ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 2.1. Формирование элементной структуры электротехнической системы

Для повышения безопасной эксплуатации специальных регулируемых электродвигателей, работающих в составе электропривода в особых условиях с изменяемым режимом работы, целесообразна разработка электротехнической системы магнитожидкостной герметизации выходных вращающихся валов электродвигателя с возможностью управления свойствами МЖГ в зависимости от условий эксплуатации. Элементная структура электротехнической системы может быть сформирована на основе следующих соображений.

При работе электродвигателя возможно изменение внешнего воздействующего перепада давлений  $\Delta p_{\text{внеш}}$ . Поэтому в электротехнической системе должен быть датчик давления. Чем больший требуется удерживать  $\Delta p_{\text{внеш}}$ , тем большая должна быть магнитная сила  $F = \mu_0 M \nabla H$ , действующая на МЖ и способная удержать этот перепад давлений. Максимальный (критический) удерживаемый перепад давлений одним зубцом МЖГ в статическом режиме

$$\Delta p_{\text{ст.кр.мжг}} = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH \cong \mu_0 M (H_{\max} - H_{\min}) \cong M (B_{\max} - B_{\min}), \quad (2.1)$$

где  $M$  – намагниченность МЖ, при значительных магнитных полях  $M = M_S$ ;  $H_{\min}$ ,  $B_{\min}$  – минимальные напряженность и индукция магнитного поля в МЖ, найденные по распределению поля на поверхности вала;  $H_{\max}$ ,  $B_{\max}$  – максимальные напряженность и индукция магнитного поля в МЖ.

Система магнитожидкостной герметизации вала в статическом режиме должна обеспечивать  $\Delta p_{\text{ст.кр.мжг}} > \Delta p_{\text{внеш}}$ . При повышении  $\Delta p_{\text{внеш}}$  может возникнуть необходимость повышать  $\Delta p_{\text{ст.кр.мжг}}$ . Из соотношения (2.1) следует, что для этого необходимо увеличивать в МЖГ магнитный поток ( $H_{\max}$ ,  $B_{\max}$ ), что можно обеспечить дополнительным магнитным потоком подмагничивающей обмотки в конструкции МЖГ. Поэтому в электротехнической системе должны

быть “обмотка(p)” давления с числом витков  $Wp$  и регулятор тока  $I_p$  в этой обмотке, изменяемый в соответствии с изменением  $\Delta p_{\text{внеш}}$ , и соответствующее изменение магнитного потока  $\Phi_p$  “обмотки(p)”.

При работе регулируемого электродвигателя в условиях возможного изменения частоты вращения  $n$  в электротехнической системе должен быть датчик частоты вращения. Чем больше  $n$  и соответствующая линейная скорость  $v_{\text{МЖ}}$  на поверхности вала, тем больше центробежная сила, действующая на МЖ и стремящаяся оторвать ее от вала. Уменьшается длина места соприкосновения МЖ пробки с валом. В предположении линейного изменения скорости течения МЖ в зазоре от вала к полюсной приставке при ламинарном течении

$$v_{\text{МЖ}}(r_0 \rightarrow \delta) = v_{\text{вал}}(1 - r/\delta) \quad (2.2)$$

критический удерживаемый перепад давлений МЖГ при вращении вала [44]

$$\Delta p_{v.\text{кр.мжг}} = \Delta p_{\text{ст.кр.мжг}} - \rho_{\text{МЖ}} v_{\text{МЖ}}^2 \delta / D, \quad (2.3)$$

где  $\rho_{\text{МЖ}}$  - плотность МЖ,  $D$  – диаметр вала,  $\delta = r - R$  – зазор между уплотняемым валом с радиусом  $R = D/2$  и полюсом с радиусом  $r$ .

При повышении  $n$  для сохранения присутствия МЖ в зазоре необходимо повышать магнитную силу, уравнивающую возрастающую центробежную силу, действующую на МЖ. Для обеспечения условия  $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}} > \Delta p_{\text{внеш}}$  при увеличении  $n$  может возникнуть необходимость повышения  $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}}$ , что может быть достигнуто увеличением магнитного потока в МЖГ ( $H_{\text{max}}$ ,  $B_{\text{max}}$ ). Это можно обеспечить дополнительным магнитным потоком другой подмагничивающей обмотки в конструкции МЖГ. Поэтому в электротехнической системе должны быть “обмотка(n)” частоты вращения вала с числом витков  $Wn$  и регулятор тока  $I_n$  в этой обмотке, изменяемый в соответствии с изменением  $n$ , и соответствующее изменение магнитного потока  $\Phi_n$  “обмотки(n)”.

При неподвижном вале и нахождении МЖ в покое, например, при останове электродвигателя или хранении его на складе и при  $\Delta p_{\text{внеш}} = 0$  для снижения фильтрации жидкости-носителя в область минимальной магнитной напряженности и концентрации ферромагнитной фазы в области максимальной напряженности в МЖГ необходим постоянный магнитный поток, но сниженный до такой

степени, чтобы только обеспечить удержание МЖ в зазоре МЖГ без вытекания при отключении катушек управления от источников питания, так как при отключении электродвигателя от сети и останове исчезает магнитный поток этих катушек. Это позволит уменьшить расслоение МЖ и увеличить ресурс работы МЖГ. Поэтому в структуре МЖГ должен присутствовать небольшой постоянный магнит с минимально необходимым магнитным потоком Фпм.

Предельная температура работоспособности МЖ  $T_{\text{МЖ.МАХ}} < (130-150) \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При большей температуре начинается вскипание МЖ и потеря свойства герметизации МЖГ. Поэтому для контроля температуры МЖ  $T_{\text{мж}}$  в электротехнической системе должен быть датчик температуры.

Таким образом электротехническая система должна содержать (рис. 2.1):

- непосредственно регулируемый электродвигатель (ЭД), работающий, возможно, от преобразователя частоты (ПЧ);

- управляемый МЖГ с токовыми обмотками и постоянным магнитом в структуре, обеспечивающим постоянный минимально требуемый магнитный поток для удержания МЖ в МЖГ при отсутствии вращения вала;

- датчик внешнего воздействующего перепада давлений  $\Delta p_{\text{внеш}}$ ;

- “обмотку(р)” МЖГ с током  $I_p$ , изменяемым в соответствии с изменением  $\Delta p_{\text{внеш}}$  и соответствующее изменение магнитного потока “обмотки(р)”;

- регулятор тока возбуждения “обмотки(р)” МЖГ в зависимости от  $\Delta p_{\text{внеш}}$ ;

- датчик частоты вращения вала электродвигателя;

- “обмотку(н)” МЖГ с током  $I_n$ , изменяемым в соответствии с частотой вращения вала МЖГ и соответствующим изменением магнитного потока “обмотки(н)”;

- регулятор тока возбуждения “обмотки(н)” МЖГ в зависимости от частоты вращения вала электродвигателя;

- датчик температуры для контроля максимальной температуры МЖ.

Таким образом обоснована элементная структура управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

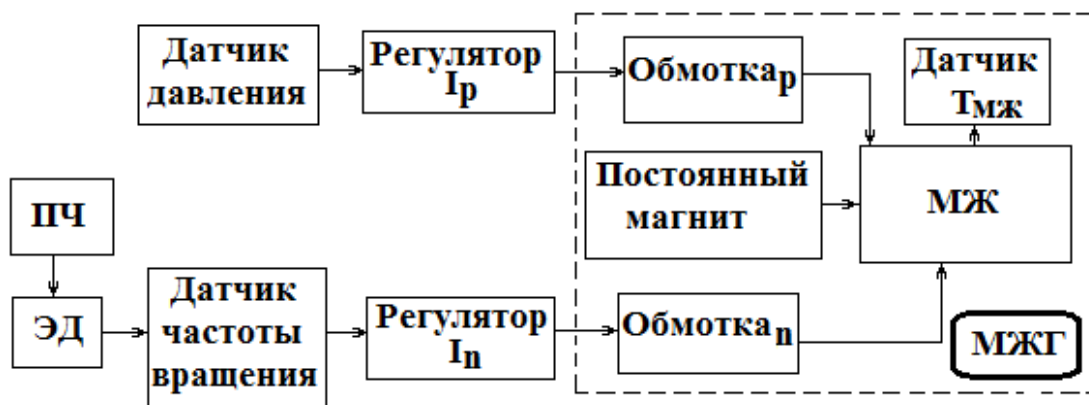


Рис. 2.1. Элементная структура электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей

## 2.2. Разработка конструкций управляемых магнитожидкостных герметизаторов валов электродвигателей

Для реализации управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей обычно используемые конструкции МЖГ подходят не в полной мере. Необходима разработка модернизированной конструкции МЖГ валов регулируемых электродвигателей в целях повышения надежности герметизации. В Главе 1 отмечалось, что в отдельных конструктивных решениях предлагалось использование в МЖГ кроме постоянного магнита дополнительной обмотки и изменением тока в ней регулировать интенсивность магнитного поля в зазоре МЖГ в зависимости или от частоты вращения, или от перепада давлений. Однако системного конструктивного решения предложено не было.

Для герметизации вала регулируемого электродвигателя разработан МЖГ, защищенный патентом на изобретение [49], который устанавливается в подшипниковый щит или крышку подшипника двигателя. МЖГ содержит (рис. 2.2): корпус 1, выполненный при осевой намагниченности магнита из немагнитного материала; кольцевой магнит 2, создающий магнитный поток  $\Phi_1$  (в режиме останова  $\Phi_1 = \Phi_{пм}$  необходимый только для удержания МЖ в условиях покоя); два полюсных наконечника 3 и 4 из магнитопроводящего материала, образующие с валом 6 уплотняемые зазоры 5, заполненные МЖ, на поверхностях полюсных

наконечников, обращенных к валу, выполнены кольцевые канавки, формирующие зубчатую структуру; датчик температуры МЖ 13; две кольцевые, соосные с валом, обмотки (каждая разделенная на две катушки 7,8 и 9,10 и включенные согласно) в корпусах 11 и 12 из магнитопроводящего материала, соединенные одна с датчиком давления, другая с датчиком частоты вращения вала, с токами  $I_p$  и  $I_n$  и создающие магнитные потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  для регулирования результирующего магнитного потока в

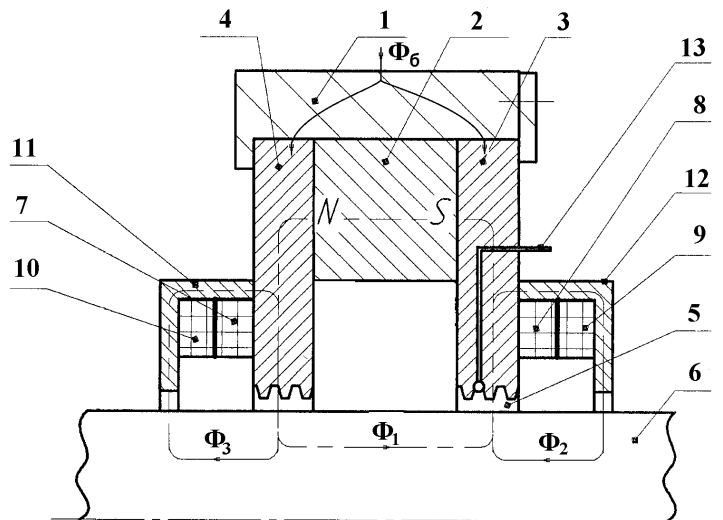


Рис. 2.2. Конструкция МЖГ регулируемого электродвигателя с немагнитным корпусом

зазоре МЖГ в зависимости от частоты вращения вала и требуемого удерживаемого перепада давлений. Дополнительно в зазоре между кольцевыми магнитопроводящими корпусами 11, 12 и валом 6 магнитными потоками  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  и частично магнитным потоком  $\Phi_1$  будут удерживаться две дополнительные магнитожидкостные пробки и повышаться герметизирующая способность МЖГ.

Если необходимо исключить влияние магнитного потока торцевого рассеяния электродвигателя  $\Phi_b$  на работу МЖГ, то корпус 1 следует выполнять из немагнитного материала. В случае целесообразности оказания влияния  $\Phi_b$  на работу МЖГ, например, для увеличения дополнительной магнитной силы, удерживающей МЖ в зазоре, или увеличения доли электромагнитной энергии,

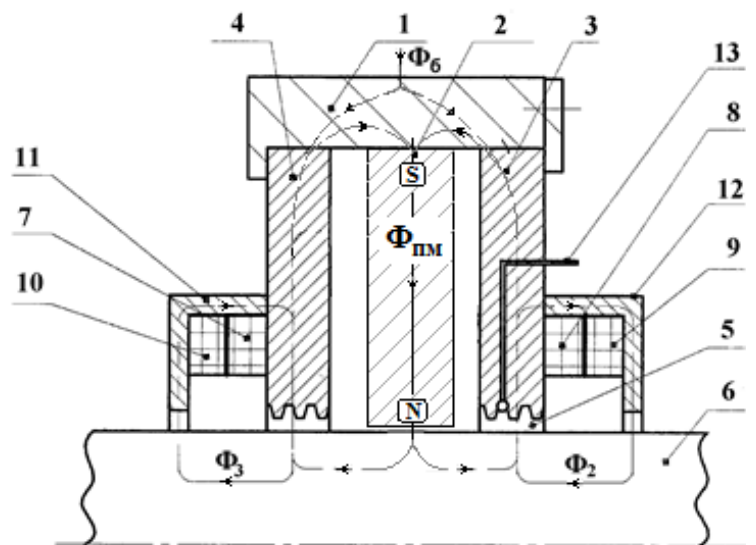


Рис. 2.3. Конструкция МЖГ регулируемого электродвигателя с магнитопроводящим внешним корпусом



расходуемой на вращение МЖ, корпус 1 нужно выполнять из магнитопроводящего материала, а постоянный магнит применять радиальной намагниченности. Такая конструкция приведена на рисунке 2.3. Магнитные потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  являются результирующими от взаимодействия магнитных потоков  $\Phi_r$ ,  $\Phi_n$ ,  $\Phi_{пм}$  и  $\Phi_b$  с учетом направленности токов в обмотках и нелинейности магнитных характеристик МЖГ.

Таким образом для системы герметизации регулируемых электродвигателей разработаны конструкции управляемых МЖГ [18,19,27,30,87,109].

### 2.3. Способ, схема и средства управления электротехнической системой

В электротехнической системе магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей присутствует узел регулирования свойств МЖГ. Электрическая схема регулирования магнитного потока в МЖГ представлена на рис. 2.4 и включает:

обмотку (р) (см. рис. 2.2), состоящую из двух катушек  $L_1$  (поз. 8) и  $L_2$  (поз. 9); обмотку (п), состоящую из двух катушек  $L_3$  (поз. 16) и  $L_4$  (поз. 17); датчик давления ВР (поз. 12); шунтирующий диод VD (поз. 14); реле К (поз. 13) с прерывателями (поз. 15); датчик частоты вращения вала BR (поз. 19);

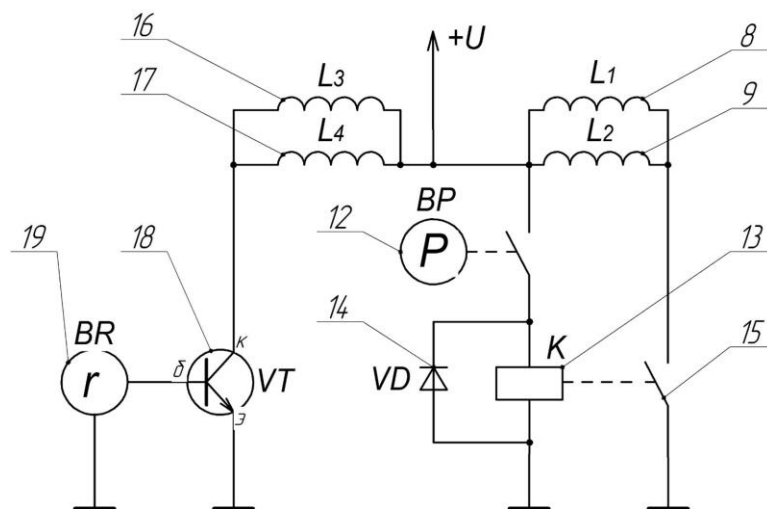


Рис. 2.4. Электрическая схема регулирования тока в катушках обмоток в зависимости от сигналов датчиков

19); транзисторный регулятор тока VT (поз. 18).

Датчик давления ВР подключен к катушкам  $L_1$  и  $L_2$ , соединенным с реле К, шунтированным диодом VD, через прерываемый контакт 15. Катушки  $L_3$  и  $L_4$  соединены с транзисторным регулятором тока VT, к которому подключен датчик частоты вращения вала BR. В качестве датчика частоты вращения вала могут

применяться, например, тахогенератор, фотоэлектрический датчик, стробоскопический датчик или другие датчики. В уплотняемом зазоре размещен датчик температуры МЖ соединенный с прерывателем, подключенный к устройству управления электродвигателем. В качестве датчика температуры МЖ могут применяться, например, терморезистор, термопара, тепловизор с выходным электрическим сигналом или другие датчики.

При работе электродвигателя узел регулирования магнитного потока обеспечивает требуемые параметры магнитного поля в зазоре МЖГ в зависимости от условий эксплуатации электродвигателя в режимах останова, кратковременного или продолжительного режимов работы. При увеличении частоты вращения вала система увеличивает магнитный поток в зазоре МЖГ, увеличивая магнитную силу, удерживающую МЖ в МЖГ путем увеличения тока в катушках обмотки(н). При вращении вала сигнал от датчика частоты вращения поступает на контакт «база» транзисторного регулятора тока, который открывает транзистор, обеспечивая протекания тока в цепи через контакты «эмиттер» - «коллектор», происходит включение катушек  $L_3$  и  $L_4$  обмотки(н), в которой возбуждается дополнительные магнитные потоки  $\Phi_n$ , повышающие магнитную индукцию в зазоре МЖГ. Пропускная способность транзисторного регулятора тока изменяется в зависимости величины сигнала от датчика частоты вращения. При повышении частоты вращения вала по сигналу датчика частоты вращения увеличивается пропускная способность транзисторного регулятора тока, что приводит к увеличению дополнительных магнитных потоков  $\Phi_n$ , при снижении частоты вращения вала по сигналу датчика частоты вращения уменьшается пропускная способность транзисторного регулятора тока, что приводит к уменьшению дополнительных магнитных потоков  $\Phi_n$ .

При повышении действующего внешнего перепада давлений выше заданного предела, сигнал от датчика давления поступает на реле, должен появиться сигнал о разгерметизации. Посредством контакта 15 происходит включение катушек  $L_1$  и  $L_2$  обмотки(р), возбуждающих дополнительные магнитные потоки  $\Phi_r$ , повышающие магнитную индукцию в зазоре МЖГ. При понижении

воздействующего внешнего перепада давлений контакты датчика давления замыкаются, происходит обесточивание реле и размыкание контакта, при этом катушки  $L_1$  и  $L_2$  обмотки(р) обесточиваются и прекращается возбуждение дополнительных магнитных потоков  $\Phi_r$ . Диод нужен для предотвращения повреждения элементов сети высоковольтным импульсом ЭДС самоиндукции, который возникает при обесточивании обмотки реле.

При повышении температуры МЖ выше допустимой  $T_{max}$ , задаваемой в качестве ограничения пользователем, датчик температуры, расположенный в зоне МЖ, размыкает и обесточивает питающую цепь электродвигателя. Это обеспечивает защиту МЖ от вскипания, расслоения и, тем самым, увеличивая ресурс работы МЖУ, исключает аварийные ситуации.

Применение узла регулирования магнитного потока в МЖГ обеспечивает управление величиной магнитного потока в МЖ в зазоре МЖГ, что позволяет производить настройку свойств МЖГ в зависимости от условий эксплуатации на соответствие удерживаемого перепада давлений критическому внешнему воздействию перепаду давлений МЖГ, с учетом предельной частоты вращения вала электродвигателя и предельной температуры МЖ.

Таким образом, выбранные средства и разработанная схема управления обеспечивают регулирование свойств МЖГ.

## **2.5. Разработка и анализ схемы функционирования системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей**

**Схема функционирования** электротехнической системы магнитожидкостной герметизации вращающихся валов регулируемых электродвигателей в графическом виде иллюстрирует схему работы системы с учетом воздействующих (возмущающих) величин, показывает системные взаимные связи между элементами, направления воздействий в системе, влияние составных частей системы друг на друга. Схема функционирования может быть сформирована на основе структурной схемы с добавлением условий регулирования в электротехнической системе, модели объекта управления (МОУ) и условий останова работы

системы. При изменении режима и условий работы регулируемого электродвигателя (ЭД) вследствие изменения питающего напряжения  $U$ , частоты  $f$  и мощности  $P$ , что вызывает изменение тока  $I_{эд}$ , система должна реагировать на изменение частоты вращения вала  $n$ , внешнего воздействующего перепада давлений  $\Delta p_{внеш}$ , внешней температуры  $T_{внеш}$  при недопустимости превышения предельной частоты вращения вала  $n_{МАХ}$ , максимально допустимого перепада давлений  $\Delta p_{МАХ}$  и максимально допустимой температуры МЖ  $T_{max}$  (рис. 2.5).

Ток электродвигателя  $I_{эд}$  в лобовых частях обмоток статора и ротора создает торцевой магнитный поток рассеяния  $\Phi_b$ , воздействующий на МЖ.

**Анализ схемы функционирования.** Электротехническая система герметизации валов регулируемых электродвигателей представляет систему регулирования, в которой изменения токов  $I_p$  и  $I_n$  в обмотках (р) и (n) обеспечиваются регуляторами по заложенным функциям формирования управляющих воздействий, например, на основе заложенных разработанных математических моделей управления. Регуляторы токов  $I_p$  и  $I_n$  в обмотках представляют функциональные звенья без обратных связей. Изменение  $I_p$  и  $I_n$  происходит с высоким быстродействием, постоянная времени формирования токов определяется электромагнитной постоянной времени обмоток с соотношением их индуктивностей и активных сопротивлений. Магнитная жидкость практически мгновенно откликается на изменение внешнего магнитного поля [44]. Изменение внешнего воздействующего перепада давлений в МЖГ в конструкциях с ненулевым объемом не мгновенное и происходит с газодинамической постоянной времени, которая превышает электромагнитную постоянную времени обмоток регулятора. Изменение частоты вращения электродвигателя происходит с электромеханической постоянной времени, которая существенно больше электромагнитной постоянной времени обмоток регулятора. Поэтому функциональные звенья регулирования магнитного поля в МЖГ по сигналам с датчиков давления и частоты вращения можно считать безынерционными.

Таким образом разработана схема функционирования электротехнической системе, проведен ее анализ.

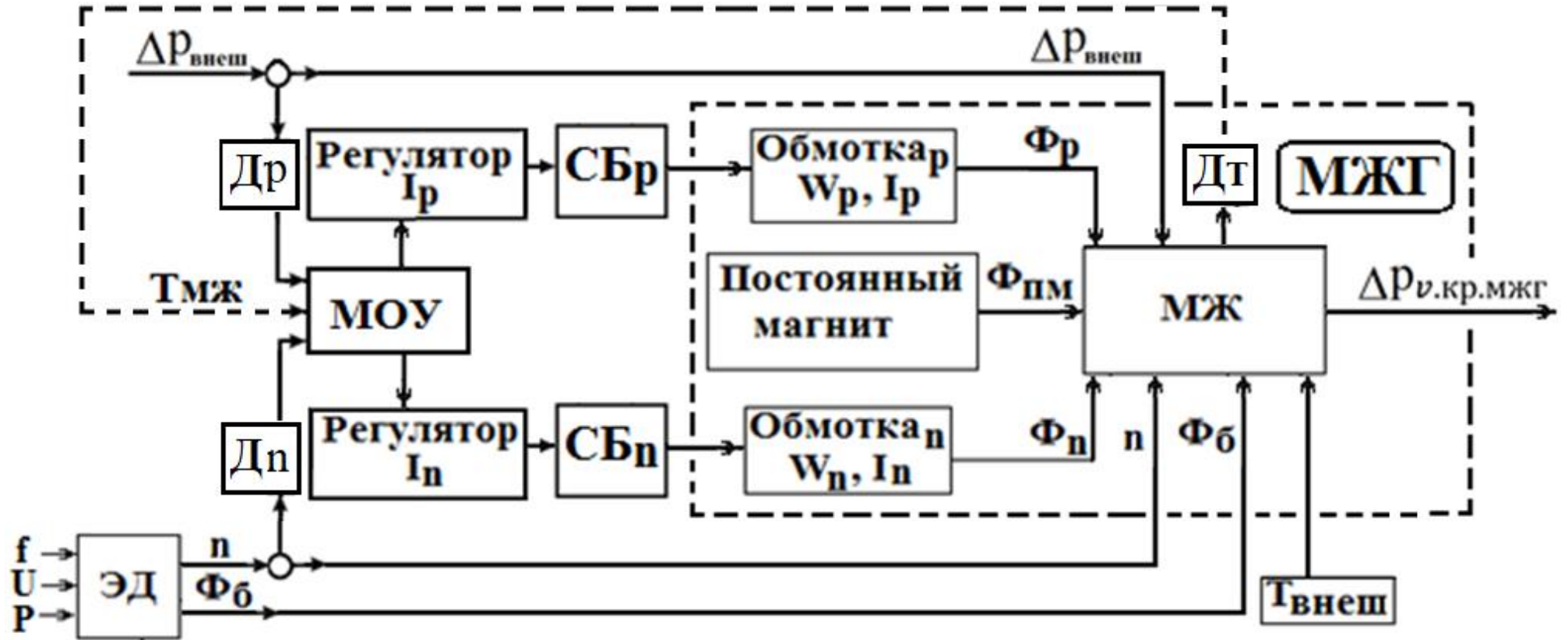


Рис. 2.5. Схемы функционирования электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей

## **2.6. Выводы**

1. Разработанные элементная структура позволяет реализовать управляемую электротехническую систему магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

2. Разработанные патентозащищённые конструктивные решения управляемых магнитожидкостных герметизаторов, обеспечивают повышенную эффективность герметизации вращающихся валов при изменении условий и режима работы регулируемых электродвигателей.

3. Выбранный способ и средства управления, разработанная схема управления электротехнической системой обеспечивают требуемое изменение характеристик магнитожидкостных герметизаторов валов регулируемых электродвигателей при изменении режима и условий работы.

4. Разработанная схема функционирования способна обеспечить управление системой герметизации с целью повышения безопасной эксплуатации регулируемых электродвигателей в различных режимах и условиях, с изменяемым режимом работы, при разнообразных внешних воздействиях.

### **3. СИСТЕМНЫЕ СВЯЗИ, МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ**

#### **3.1. Анализ системных связей элементов в электротехнической системе**

**Взаимное влияние и системные связи элементов.** В электротехнической системе магнитожидкостной герметизации вращающихся валов электродвигателей одновременно возникают и взаимодействуют между собой разные физические процессы: электромагнитные процессы в электродвигателе, воздействующие на МЖГ; создание магнитом МЖГ постоянного магнитного поля; феррогидродинамические процессы при движении МЖ с нелинейными реологическими магнитоинвариантными характеристиками в неподвижном магнитном поле магнита и вращающемся магнитном поле рассеяния обмоток электродвигателя Фб; тепловые процессы, вызванные диссипацией энергии движения - вязким трением между движущимися с разными скоростями слоями МЖ; потенциально-силовыми процессами при компенсации воздействующего внешнего  $\Delta r_{\text{внеш}}$  магнитными силами МЖ, вследствие изменения положения МЖ пробки. Все эти процессы нелинейные и влияют друг на друга через изменение свойств материалов и/или возбуждающие факторы возникающих физических полей. Для разработки корректных математических моделей компонентов системы и их системных зависимостей целесообразно применение численного нелинейного моделирования электромагнитных и тепловых полей в элементах системы в программных комплексах Elcut и Ansys.

**Влияние электромагнитных процессов в электродвигателе на работу МЖГ** проявляется в воздействии торцевого магнитного потока рассеяния Фб от токов в лобовых частях обмоток статора и ротора электродвигателя. Магнитный поток Фб, замыкающийся через подшипниковый щит, МЖГ и вал, зависит от магнитных свойств элементов конструкции двигателя. Фб, проникая в зазор, воздействует на МЖ и изменяет свойства МЖГ. Изменение нагрузки электродвигателя вызывает изменение тока электродвигателя  $I_{\text{эд}}$  и изменение Фб. При макси-

мальном Фб влияние электромагнитных процессов в электродвигателе на поведение МЖ будет максимальным. Таким образом, при работе системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых ЭД индукция магнитного поля В в зазоре МЖГ будет зависеть от потока магнита Фпм, электромагнитных процессов в ЭД с током Iэд, токов Iр и In в подмагничивающих обмотках с магнитными потоками Фб, Фр, Фп, действующих одновременно с учетом нелинейностей магнитных характеристик элементов конструкции, то есть  $V = f(M, I_{эд}, I_p, I_n)$ .

В двигателях переменного тока Фб, созданный обмотками статора и ротора, вращается с синхронной частотой  $n_{\text{маг.поля}} = 60f/p$ , об/мин, где f – частота питающего напряжения, Гц, p – число пар полюсов электродвигателя. Так как Фб вращается, в том числе в зазоре МЖГ, а магнитный поток магнита МЖГ Фпм неподвижен, то в один и тот же момент времени в разных точках зазора Фб и Фпм будут взаимодействовать по-разному, результирующий магнитный поток в одном месте будет возрастать, в другом - уменьшаться.

Статор неподвижен. Ротор с валом вращается с частотой вращения  $n_{\text{вал}}$ . В двигательном режиме асинхронного электродвигателя  $n_{\text{вал}} < n_{\text{маг.поля}}$ . МЖ вращается в зазоре МЖГ с частотой вращения  $n_{\text{мж}}$ . Направления скоростей вращения представлены на рисунке 3.1. Вращающийся Фб воздействует на МЖ и, так как МЖ обладает магнитными свойствами, увлекает МЖ за собой. В регулируемых электродвигателях  $n_{\text{маг.поля}}$  и  $n_{\text{вал}}$  изменяются. Одновременно МЖ, вследствие вязкостных свойств, увлекается во вращение вращающимся ротором. Увлечение МЖ во вращение

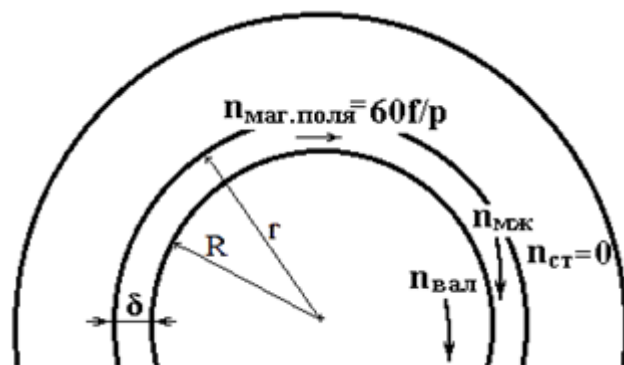


Рис. 3.1. Направления скоростей вращения

вращающимся Фб будет снижать действие момента трения  $M_{\text{тр}}$  МЖГ на вал, так как необходимая мощность на вращение МЖ  $\Delta P_{\text{мж}}$  в зазоре МЖГ будет поступать не только со стороны вращающегося вала  $\Delta P_{\text{мж.мех.вал}}$  (механическая часть мощности), но и со стороны вращающегося электромагнитного поля рассеяния обмоток  $\Delta P_{\text{мж.эм}}$  (электромагнитная часть мощности) (рис. 3.2).



Электромагнитная мощность со стороны статора  $P_{эм.ст}$  передается на ротор  $P_{эм.рот}$  и на вращение МЖ.  $\Delta P_{мж}$  определяется объемом МЖ  $V_{мж}$ , вязкостью МЖ  $\eta$ , скоростью сдвига  $\gamma$  слоев МЖ. При небольшом Фб доля  $\Delta P_{мж.эм}$  в покрытии  $\Delta P_{мж}$  будет мала, доля  $\Delta P_{мж.мех.вал}$  – определяющая. При большом Фб доля  $\Delta P_{мж.эм}$  в  $\Delta P_{мж}$  будет определяющей, доля  $\Delta P_{мж.мех.вал}$  будет мала.

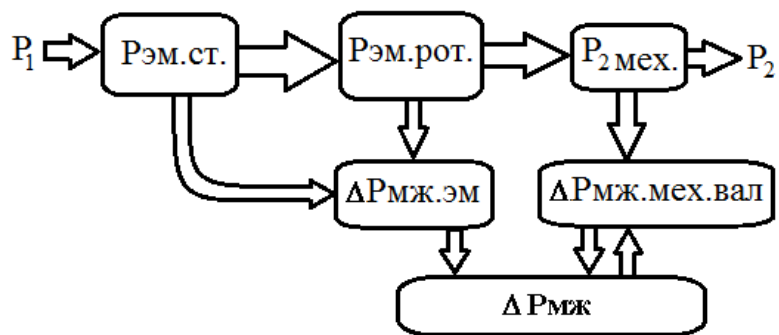


Рис. 3.2. Энергетическая диаграмма и потоки передачи энергии в МЖ на покрытие вязкостных потерь

Рис. 3.2. Энергетическая диаграмма и потоки передачи энергии в МЖ на покрытие вязкостных потерь

Для АД при нагрузке ротор с валом, относительно вращающегося с синхронной скоростью вращения магнитного поля  $n_{маг.поля}$ , вращаются со скольжением. Скорость вращения слоя МЖ на поверхности вала совпадает со скоростью вращения самого вала, скорость вращения слоя МЖ на поверхности неподвижного статора нулевая. В зазоре скорость вращения слоев МЖ может изменяться в зависимости от степени влияния вращающегося с синхронной частотой Фб. Профили скоростей МЖ в зазоре в разных режимах электродвигателя при разных Фб для  $\eta_{мж} = const$  представлены на рисунке 3.3.

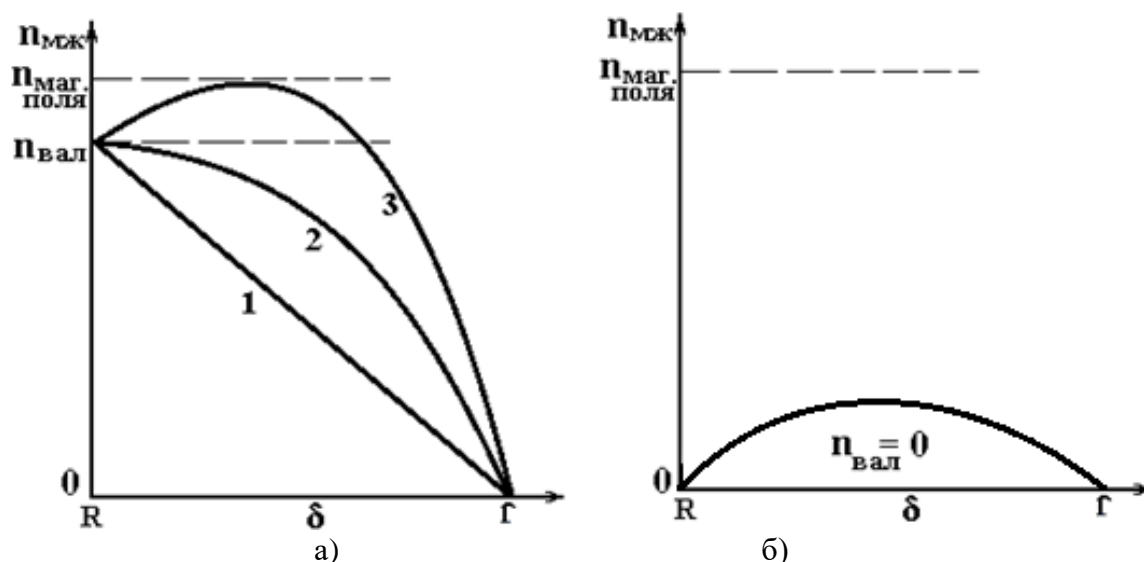


Рис. 3.3. Изменения частоты вращения слоев МЖ в зазоре МЖГ для  $\eta_{мж} = const$ : а – номинальный режим: 1 - Фб = 0; 2 - Фб > 0; 3 - Фб3 >> 0; б – момент пуска АД

При отсутствии влияния электромагнитных процессов в электродвигателе на МЖ и для постоянной вязкости МЖ изменение скорости движения слоев МЖ

в зазоре будет линейным. При влиянии электромагнитных процессов в электродвигателе на поведение МЖ в зависимости от величины  $\Phi_b$  профиль скорости движения слоев МЖ становится нелинейным, в пределе при значительном  $\Phi_b$  и невысокой  $n_{\text{маг.поля}}$  (при небольшой  $f$ )  $n_{\text{МЖ}}$  в середине зазора может стать выше  $n_{\text{вал}}$  и доходить до  $n_{\text{маг.поля}}$ .

В первый момент пуска при  $n_{\text{вал}} = 0$  МЖ увлекается во вращение вращающимся электромагнитным полем  $\Phi_{b,\text{max}}$  и может даже подтягивать за собой более инерционный ротор, т.е. передавать часть электромагнитной энергии от статора на ротор, как например это происходит в магнитожидкостных электромагнитных муфтах. Нелинейная зависимость вязкости МЖ от скорости сдвига  $\eta = f(\gamma)$ , усиленная воздействием магнитного поля с  $\eta = \eta_{\text{max}}$  при  $\gamma = 0$ , из-за структурирования МЖ приводит к тому, что при  $n_{\text{МЖ}} = n_{\text{МЖ,max}}$ ,  $\gamma = 0$ ,  $\eta_{\text{max}}$  график профиля скорости движения МЖ, увлекаемой магнитным полем, уплощается.

Вязкость МЖ  $\eta$  нелинейно зависит от скорости сдвига слоев МЖ  $\gamma$ , индукции магнитного поля  $B$ , температуры  $T$ , т.е.  $\eta = f(\gamma, B, T)$ . Возрастание магнитной индукции  $B$ , воздействующей на МЖ, нелинейно увеличивает вязкость МЖ (рис. 1.7). Можно принять, что изменение  $\eta$ ,  $\tau$  и  $\tau_0 \sim \sqrt{B}$ . Для МЖ влияние  $B$ , Тл (рис. 3.4) учтено в виде [24].

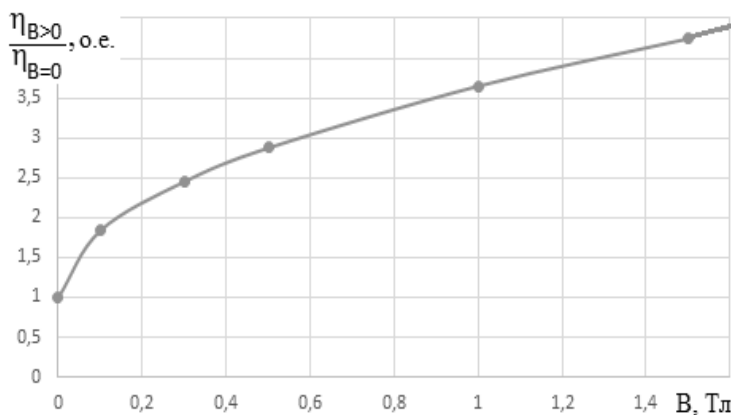


Рис. 3.4. Зависимость относительной вязкости МЖ от индукции магнитного поля при  $T_{\text{МЖ}} = 20$  °С,  $\gamma = 0$

$$\eta_{B>0}/\eta_{B=0} = 1 + 2,65\sqrt{B}; \quad \tau_{B>0}/\tau_{B=0} = 1 + 2,65\sqrt{B}; \quad \tau_{0,B>0}/\tau_{0,B=0} = 1 + 2,65\sqrt{B}. \quad (2.1)$$

В зазоре МЖГ с зубцами на полюсной приставке и гладким валом магнитная индукция  $B$  от потока Фпм собственного магнита МЖГ увеличивается от вала к зубцу приставки (см. рис. 1.9). С учетом возрастания вязкости МЖ с увеличением индукции вязкость МЖ у зубца приставки будет возрастать. Это проявляется в профиле скорости течения МЖ в зазоре –  $\gamma$  МЖ будет уменьшаться в районе зубца приставки (рис. 3.5).

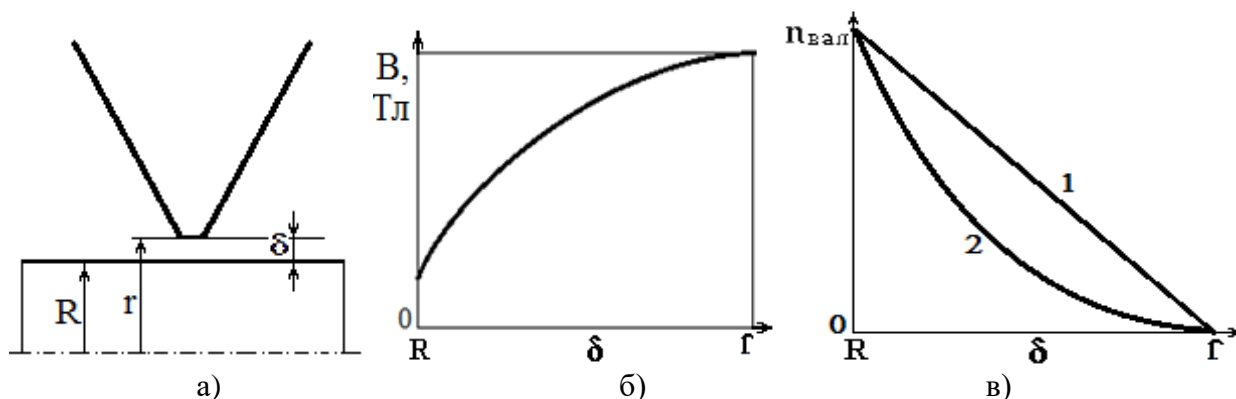


Рис. 3.5. Схема вал-зубец МЖГ (а), изменение магнитной индукции в зазоре от вала к зубцу в зазоре (б) и изменение частоты вращения слоев МЖ в зазоре (в) для: 1 -  $\eta = \text{const}$ ; 2 -  $\eta = f(B)$  (см. рис. 2.8)

При совместном воздействии вращающегося магнитного потока электродвигателя Фб и постоянного потока Фп магнита МЖГ профили скоростей течения слоев МЖ будут накладываться и образовывать изменяющийся во времени усложненный результирующий профиль скоростей течения.

Магнитная жидкость обладает нелинейной реологической характеристикой (см. рис. 1.7) -  $\eta = f(\gamma)$ ,  $\gamma$  – скорость сдвига слоев МЖ, 1/с. При линейной скорости на поверхности вала  $v_{\text{Вал}} = \pi D n / 60$ , м/с и неподвижной полюсной системе с  $v_{\text{Пол}} = 0$  при зазоре  $\delta$  среднее значение  $\gamma_{\text{СР}} = (v_{\text{Вал}} - v_{\text{Пол}}) / \delta$ . При частоте вращения электродвигателя  $n = 0$  и, соответственно,  $\gamma = 0$ , при воздействии магнитного поля магнитные частицы в МЖ создают структуры, вязкость МЖ  $\eta_{\gamma=0}$  значительна. По мере увеличения  $n$  пропорционально возрастает  $\gamma$ , структуры магнитных частиц в МЖ разрушаются, вязкость снижается и при  $\gamma > 1000 \text{ с}^{-1}$  вязкость МЖ становится постоянной – МЖ. Изменение вязкости МЖ  $\eta$  с изменением скорости сдвига  $\gamma$  в зоне небольших  $\gamma$  (рис. 3.6), по отношению к вязкости при  $\gamma = 1000 \text{ с}^{-1}$ , температуре  $T_{\text{МЖ}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , отсутствии магнитного поля, можно аппроксимировать соотношением

$$\eta_{\gamma} = 31,62 \eta_{\gamma=1000} / \sqrt{\gamma} . \quad (3.2)$$

Повышенная вязкость МЖ из-за большой магнитной индукции снижает

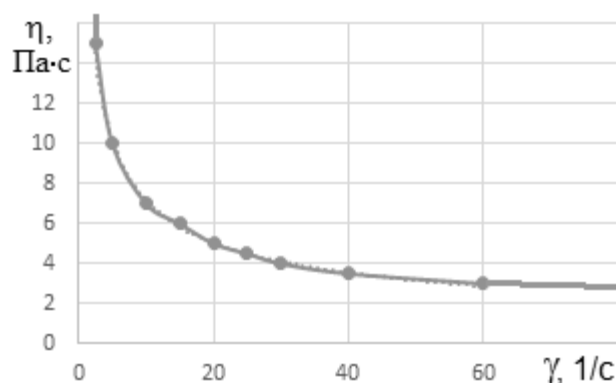


Рис. 3.6. Реологическая характеристика МЖ при  $B = 0 \text{ Тл}$ ,  $T_{\text{МЖ}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

скорость сдвига слоев МЖ в зоне зубца приставки. Вязкость МЖ дополнительно возрастает вследствие нелинейности реологической характеристики МЖ и малой скорости сдвига в этой зоне. Это нелинейно изменяет результирующий профиль скоростей течения слоев МЖ.

Вязкость МЖ при магнитной индукции  $B$  и скорости сдвига слоев МЖ  $\gamma$  может быть описана соотношением [23]

$$\eta_{B,\gamma} = \eta_{B,\gamma=\infty} + (\eta_{B,\gamma=0} - \eta_{B,\gamma=\infty})[1 + (K_B\gamma)^2]^m, \quad (3.3)$$

где  $\eta_{B,\gamma=\infty}$  – вязкость МЖ (наименьшая) при индукции  $B$  и стремящемся к бесконечности  $\gamma$ ;  $\eta_{B,\gamma=0}$  – вязкость МЖ (наибольшая) при индукции  $B$  и околонулевом  $\gamma$ ;  $K_B$  – коэффициент зависящий от  $B$ ;  $m$  – показатель степени.

При работе в МЖ развиваются тепловые процессы, обусловленные диссипацией энергии движения - вязким трением между движущихся с разными скоростями слоями МЖ. Из-за невысокой теплопроводности в МЖ могут возникать зоны с предельной температурой  $T_{\max}$ . Разогрев МЖ до температуры  $T_{\text{мж}}$  с учетом действия внешней температуры  $T_{\text{внеш}}$  определяется результирующим магнитным потоком, воздействующим на МЖ, частотой вращения вала (скоростью сдвига слоев МЖ), теплофизическими характеристиками МЖ.

С ростом температуры МЖ ее вязкость нелинейно снижается. При нагреве МЖ от  $20^\circ\text{C}$  до  $130^\circ\text{C}$  вязкость может снизиться до 10 раз. Изменение вязкости  $\eta_T$  МЖ МКС 350-30 с изменением температуры  $T_{\text{мж}}$  (см. табл. 1.2, рис. 3.7) по отношению к вязкости этой

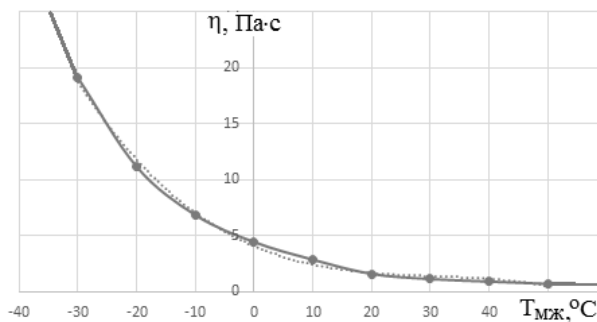


Рис. 3.7. Температурная зависимость вязкости МЖ МКС 350-30 и ее аппроксимация

МЖ при температуре  $20^\circ\text{C}$  -  $\eta_{20}$  можно описать как

$$\eta_T = \eta_{20}(3e^{-0.05T_{\text{мж}}}), \quad (3.4)$$

где  $e=2,718$  – основание натурального логарифма.

Повышение  $T_{\text{мж}}$  уменьшает намагниченность МЖ. Температурный коэффициент изменения намагниченности МЖ достигает  $\beta_M = -(0.1-0.15) \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Теплопроводность МЖ в направлении магнитного потока с ростом  $B$  возрастает до

15 %. В перпендикулярном направлении теплопроводность МЖ практически не зависит от индукции. С увеличением  $T_{мж}$  вязкость МЖ нелинейно снижается, что уменьшает вязкостные потери. Увеличенные выделяемые вязкостные потери в районе зубца наиболее сильно разогревают МЖ в этой зоне, что снижает здесь вязкость МЖ и дополнительно усложняет результирующий профиль скоростей течения слоев МЖ.

Таким образом для корректного анализа удерживающей способности МЖГ в электродвигателях с учетом сложных и нелинейных зависимостей вязкости МЖ от скорости сдвига слоев МЖ, индукции магнитного поля, температуры МЖ, взаимодействия вращающего магнитного поля торцевого рассеяния электродвигателя с постоянным магнитным полем магнита МЖГ, сложной структуры торцевой зоны электродвигателя с размещением лобовых частей обмоток статора и ротора требуется развитое трехмерное моделирование магнитоферрогидродинамической задачи.

Выделяемая в МЖ мощность вязкостных потерь  $\Delta P_{мж}$  покрывается за счет энергии электродвигателя, что вызывает момент трения  $M_{тр}$  МЖГ.  $M_{тр}$  - важная характеристикой МЖГ, в прецизионных установках  $M_{тр}$  может являться определяющим свойством. При пуске электродвигателя, вследствие начального напряжения сдвига  $\tau_0$ , в МЖГ возникает момент страгивания  $M_{стр}$ , который должен учитываться при определении характеристик системы.

При компенсации внешнего воздействующего  $\Delta p_{внеш}$  магнитными силами в МЖ возникают нелинейные потенциально-силовые процессы, происходит деформация положения и формы поверхности МЖ. Их нахождение возможно итерационным путем на основе анализа перераспределений магнитного поля.

Поэтому в связи с нелинейными магнитными характеристиками с учетом насыщения элементов конструкции МЖГ и электродвигателей, многообразными нелинейными зависимостями свойств МЖГ от режима работы ЭД, частоты вращения вала, удерживаемого перепада давлений системные связи элементов и условия регулирования в системе являются сложными и нелинейными.

Таким образом проведен анализ системных связей элементов.

### 3.2. Обоснование условий регулирования, математическая модель и алгоритм формирования управляющих воздействий в системе

**Обоснование условий регулирования.** Если  $\Delta p_{\text{внеш}}$ , определяемый датчиком давления, превышает  $\Delta p_{\text{max}}/k_{\text{зап}}$ , где  $\Delta p_{\text{max}}$  - максимально допустимый перепад давлений, задаваемый в качестве ограничения,  $k_{\text{зап}} = 1,5-3$  - коэффициент запаса [64], то система выдает сигнал на останов. При  $k_{\text{зап}}\Delta p_{\text{внеш}} < \Delta p_{\text{max}}$  то по величине  $\Delta p_{\text{ст.кр.мжг}} = k_{\text{зап}}\Delta p_{\text{внеш}}$  и задающей функции  $I_p = f(\Delta p_{\text{ст.кр.мжг}})$  регулятор формирует  $I_p$  в обмотке(p). При возрастании  $\Delta p_{\text{внеш}}$  регулятор увеличивает  $I_p$ , возрастает магнитный поток  $\Phi_p$ . Если  $\Delta p_{\text{внеш}}$  отсутствует, то  $I_p = 0$ . Если частота вращения  $n$ , определяемая датчиком частоты вращения, превышает  $n_{\text{max}}/k_{\text{зап}}$ , где  $n_{\text{max}}$  - максимально допустимая частота вращения, задаваемая в качестве ограничения, то система выдает сигнал на останов. При  $k_{\text{зап}}n < n_{\text{max}}$  по величине  $k_{\text{зап}}n$  и задающей функции  $I_n = f(k_{\text{зап}}n)$  регулятор формирует  $I_n$  в обмотке(n). При возрастании  $n$  регулятор увеличивает  $I_n$ , возрастает магнитный поток  $\Phi_n$ . Если  $n$  мал или отсутствует, то  $I_n = 0$ . Возрастание магнитного потока в зазоре МЖГ можно осуществлять до определенных значений. При чрезмерных магнитных потоках и магнитных силах, действующих на ферромагнитные частицы в МЖ, может разрушиться оболочка поверхностно-активного вещества, покрывающая магнетитовые частицы, их агрегатирование в МЖ и выпадение в осадок, что вызовет потерю герметизации МЖГ. Снижение магнитного потока обеспечивает увеличение времени работоспособности МЖГ. Можно сразу создать в МЖГ максимальный магнитный поток, например, установив сильный магнит. Однако это удорожит систему; усилится структурирование МЖ при нулевой и/или околонулевой  $n$ , что повысит  $M_{\text{стр}}$ ; возрастет вязкость МЖ, увеличатся вязкостные потери и  $M_{\text{тр}}$ ; при останове вала ускорится процесс расслоения МЖ.

Если  $T_{\text{мж}}$ , фиксируемая датчиком температуры, превышает максимально допустимую  $T_{\text{max}}$ , задаваемую в качестве ограничения, то система выдает сигнал на останов. Если  $T_{\text{мж}} < T_{\text{max}}$ , то система выдает сигнал разрешения продолжения регулирования в системе на регуляторы  $I_p$  и  $I_n$ .

**Математическая модель и алгоритм формирования управляющих воздействий.** Для формирования управляющих воздействий регуляторов в системе используется модель (МОУ) МЖГ на основе расчета свойств МЖГ. С датчиков поступают сигналы о величинах  $T_{мж}$ ,  $\Delta p_{внеш}$ ,  $n$ ,  $T_{внеш}$ . Выполняется проверка на ограничения регулирования при заданных  $\Delta p_{max}$ ,  $T_{мж.max}$ ,

$$n_{мж.крит.Т} = \frac{60}{\pi D} \sqrt{8(T_{мж.max} - T_{внеш})\lambda/\eta}. \quad (3.5)$$

Если  $\Delta p_{внеш} \leq \Delta p_{max}$ ,  $T_{мж} \leq T_{мж.max}$  и  $n \leq n_{мж.крит.Т}$ , то осуществляется регулирование в системе.

В достаточно приближенном предположении отсутствия падения магнитного напряжения в стальных участках МЖГ и при преодолении  $\Phi_r$  дважды зазора  $\delta$  (при замыкании силовой линии) определяются  $B_{max}$ ,  $B_{min}$

$$B_{min} = 0, B_{max} = \mu_0 F_{маг.p} / (2\delta) = I_p W_p 10^{-6} / (1,59\delta). \quad (3.6)$$

Рассчитывается критический удерживаемый перепад давлений МЖГ при вращении вала. Для обеспечения условия по удержанию перепада давлений

$$\Delta p_{v.кр.мжг} = Z[M(B_{max} - B_{min}) - \rho_{мж} v_{мж}^2 \delta / D], \quad (3.7)$$

где  $v_{мж} = \pi D n / 60$  – окружная скорость МЖ на валу,

который сравнивается внешним воздействующим перепадом давлений  $\Delta p_{внеш}$ .

При  $\Delta p_{v.кр.мжг} > k_{зап} \Delta p_{внеш}$  условия регулирования успешно выполнены. При  $\Delta p_{v.кр.мжг} \leq k_{зап} \Delta p_{внеш}$  для данных параметров системы регулирования герметизация МЖГ может быть нарушена. Поэтому переход к регулированию токов  $I_p$  и/или  $I_n$ .

Ток регулирующей обмотки ( $p$ )

$$I_p = \frac{1,59\delta 10^6}{M W_p} \left[ k_{зап} \Delta p_{внеш} / Z + \rho_{мж} \left( \frac{\pi D n}{60} \right)^2 \delta / D \right] = f(\Delta p_{внеш}, n, T_{мж}). \quad (3.8)$$

Для обеспечения условия по допустимой температуре МЖ определяется критическая линейная скорость МЖ  $n \leq n_{мж.крит.Т}$  в достаточно приближенном

предположении зависимости (см. раздел 3.1)  $\eta_{B_{мж}} = \eta_{B=0} (1 + 2,65\sqrt{B_{мж}})$  и

$$B_{мж} = \mu_0 F_{маг.n} / (2\delta) = I_n W_n 10^{-6} / (1,59\delta) \quad (3.9)$$

определяется ток регулирующей обмотки ( $n$ )

$$I_n = \frac{1,59\delta 10^6}{W_n} \left[ \frac{8\lambda(T_{\text{МЖ.мах}} - T_{\text{МЖ}}) - \left(\frac{\pi D n}{60}\right)^2 \eta_{B=0}}{2,65} \right]^2 = f(n, T_{\text{МЖ}}). \quad (3.10)$$

В разработанном алгоритме программы по заданным: переменным -  $n$ ,  $\Delta p_{\text{внеш}}$ ,  $T_{\text{внеш}}$ ,  $I_{\text{эд}}$ ; ограничениям -  $n_{\text{мах}}$ ,  $\Delta p_{\text{мах}}$ ,  $T_{\text{МЖ.мах}}$ ; шагам регулирования -  $\Delta I_p$ ,  $\Delta I_n$  для заданных параметров МЖ и магнита, значений  $I_p$ ,  $I_n$  на текущей итерации производится определение потоков  $\Phi_{\text{пм}}$ ,  $\Phi_r$ ,  $\Phi_n$  и  $\Phi_b$  методами расчета магнитных цепей или моделирования магнитных полей, например, [10,25,71]. Для заданной конструкции МЖГ определяются  $B_{\text{мах}}$ ,  $B_{\text{мин}}$  по суммарной магнитодвижущей силе (МДС) постоянного магнита и токовых обмоток

$$F_{\text{МАГ}} = F_{\text{ПМ}} \pm I_p W_p \pm I_n W_n. \quad (3.11)$$

Так как  $B_{\text{мах}} \gg B_{\text{мин}}$ , то в первом приближении верхняя оценка критического перепада давлений в статическом режиме

$$\Delta p'_{\text{ст.кр.мжг}} = Z M_S B_{\text{мах}}. \quad (3.12)$$

Момент трения МЖГ  $M_{\text{тр}}$ , обусловленный вязкостным трением МЖ, при ламинарном течении МЖ может определяться по соотношению [44]

$$M_{\text{тр}} = FR = \eta R Z S v / \delta = 2\pi \eta Z R^2 S n / (60\delta), \quad (3.13)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость МЖ, зависящая от скорости сдвига слоев МЖ, индукции магнитного поля, температуры;  $v$  – окружная скорость вала;  $S$  - площадь поверхности вала под зубцом, соприкасающейся с МЖ, зависит формы и положения магнитожидкостной пробки под зубцом, шероховатости поверхностей;  $Z$  – число зубцов МЖГ;  $2R = D$  - диаметр вала,  $n$  – частота вращения вала;  $v/\delta = \gamma$  – скорость сдвига слоев МЖ в зазоре;  $\eta\gamma = \tau$  – напряжение сдвига;

$$F = \eta S v / \delta = \tau S - \text{усилие сдвига.}$$

Для полюсных приставок с прямоугольными зубцами шириной  $b$

$$M_{\text{тр}} = 4\pi^2 Z \eta n R^3 b / (60\delta). \quad (3.14)$$

Для страгивания МЖ и приведение ее в движение необходимо приложить момент страгивания  $M_{\text{стр}}$  [44,41]

$$M_{\text{стр}} = \beta R Z S \tau_{0,B>0}, \quad (3.15)$$



где  $\beta$  - коэффициент структурирования;  $R$  – радиус вала;  $Z$  – число зубцов МЖГ;  $S$  - площадь поверхности вала под зубцом, соприкасающаяся с МЖ;  $\tau_{0,B>0}$  – напряжение начального сдвига при индукции  $B>0$ .

Увеличение  $\tau$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $Z$  повышает в МЖГ  $M_{тр}$  и  $M_{стр}$ . Возрастание  $n$  и уменьшение  $\delta$  увеличивают  $\gamma$ , что повышает  $M_{тр}$ . Снижение  $\eta$  уменьшает  $M_{тр}$ . Таким образом  $M_{стр}, M_{тр} = f(Z, \eta, \gamma, B, T)$ .

Мощность диссипационных потерь в МЖ от вязкого трения перемещающихся в тангенциальном направлении слоев МЖ покрывается потребляемой от ЭД мощностью  $\Delta P_{мж}$ . При линейном изменении скорости течения МЖ в зазоре удельная мощность диссипации в МЖ, преобразуемая в тепловыделения,

$$\Delta P_{мж} = 0.5\eta\gamma^2 = 0.5\eta\left(v/\delta\right)^2. \quad (3.16)$$

Снижение  $\eta$  и  $\gamma$  уменьшает вязкостные потери. Магнитная индукция, воздействуя на  $\eta$  МЖ, влияет на диссипационные потери.

Определить  $\Delta P_{мж}$  также можно по  $n$  и ранее рассчитанному  $M_{тр}$

$$\Delta P_{мж} = M_{тр} \cdot \omega = 2\pi n M_{тр}. \quad (3.17)$$

Уточненный расчет  $M_{тр}$  и  $\Delta P_{мж}$  возможен на основе численного моделирования распределения поля скоростей движения на множестве элементов МЖ.

Вязкостные потери разогревают МЖ, температура МЖ  $T_{мж}$  определяется тепловыделениями и условиями охлаждения с учетом процессов теплопроводности и теплоотдачи. Тепловые процессы в МЖ характеризуются критерием Прандтля  $Pr$  - во сколько раз количество тепла, выделившееся от вязкостного трения МЖ, больше тепла, отведенного за счёт теплопроводности,

$$Pr = \eta C_Q / \lambda, \quad (3.18)$$

где  $\eta$  – вязкость МЖ,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $C_Q$  – теплоёмкость.

Для применяемых МЖ  $Pr > 1000$ . То есть бóльшая часть энергии вязкостной диссипации идет на разогрев МЖ, отвод теплоты за счет теплопроводности невелик. Наиболее сильный разогрев МЖ будет в зоне под зубцом вследствие повышенной вязкости МЖ из-за больших магнитных индукций. Одновременно

возрастание температуры снижает вязкость МЖ. Для регулируемых ЭД целесообразно применять маловязкие МЖ с повышенной теплопроводностью.

Оценочное значение установившейся температуры МЖ  $T_{МЖ}$  относительно внешней температуры  $T_{ВНЕШ}$  для  $T_{МЖ}$ :

$$\text{по [44]} \quad T_{МЖ} = T_{ВНЕШ} + \eta v^2 / (2\lambda) ; \quad (3.20)$$

$$\text{по [74]} \quad T_{МЖ} = T_{ВНЕШ} + \eta v^2 / (8\lambda) . \quad (3.21)$$

$$\text{Усредненное соотношение} \quad T_{МЖ} = T_{ВНЕШ} + \eta v^2 / (5\lambda) . \quad (3.22)$$

При динамическом процессе нагрева МЖ, например, в первый период начала работы, температура МЖ изменяется экспоненциально со временем  $t$

$$T_{МЖ} = T_{ВНЕШ} + (T_{МЖ.УСТ} - T_{ВНЕШ})(1 - e^{-t/\zeta}) , \quad (3.23)$$

где  $\zeta = C_Q m / \alpha S$  – постоянная времени нагрева;  $T_{МЖ.УСТ}$  – установившаяся температура МЖ по окончании процесса нагрева;  $C_Q$  – удельная теплоемкость МЖ;  $m$  – масса МЖ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – поверхность теплоотдачи.

При постоянном тепловыделении через время  $t = (3-4)\zeta$  температура в МЖ устанавливается с погрешностью до 5 %. Уточненный расчет распределения температуры в МЖ возможен с использованием детализированных тепловых схем замещения или численного моделирования теплового поля.

Если полученное значение  $T_{МЖ} > T_{max}$ , то дальнейшая работа МЖГ невозможна. Если  $T_{МЖ} < T_{max}$ , то дальнейшее регулирование МЖГ по тепловому режиму возможно и возможна подстройка системой свойств МЖГ под внешние условия:  $\Delta p_{ВНЕШ}$  и  $n$ .

$$v'_{МЖ.КРИТ} \leq \sqrt{D[M(B_{max} - B_{min}) - \Delta p_{ВНЕШ}/Z] / (\rho_{МЖ}\delta)} ; \quad (3.24)$$

- исходя из максимально допустимой температуры

$$v''_{МЖ.КРИТ} \leq \sqrt{8(T_{max} - T_{ВНЕШ})\lambda/\eta} . \quad (3.25)$$

Из значений (3.16 и 3.17) выбирается меньшее  $v_{МЖ.КРИТ}$ . По результату сравнения  $n$  с  $n_{КРИТ} = 60v_{МЖ.КРИТ}/(\pi D)$  выбирается канал регулирования  $I_p$  или  $I_n$  и  $I_r$ .

Таким образом представлен модель и алгоритм формирования управляющих воздействий в электротехнической системе на основе расчета свойств МЖГ.

### 3.3. Применение методов планирования эксперимента для формализации системных связей в системе магнитоэлектрической герметизации

Формализация системных связей в электротехнической системе магнитоэлектрической герметизации валов регулируемых электродвигателей для реализации их в виде задающих функций регуляторов в системе затрудняется нелинейностью возникающих в системе физических процессов и их взаимным влиянием, что затрудняет использование единой схемы учета связей элементов в обобщенном виде. Так процесс определения показателей МЭГ:  $T_{мж}$ ,  $\Delta p_{мжг}$ ,  $M_{тр}$ ; осложняется необходимостью одновременного учета разных по природе факторов: частоты вращения вала, электромагнитных процессов в электродвигателе, воздействующего перепада давлений, температуры, шероховатостей поверхностей вала и др.

Обработка результатов трудоемких вычислительных экспериментов или опытных данных с формированием функциональных зависимостей в виде системных связей, как, например, для изложенного выше алгоритма, целесообразна с использованием методов планирования. Методы позволяют по численным результатам описать физические явления в форме математических моделей, обычно в виде полиномов. Применение полиномиальных моделей удобно для дальнейшего анализа полученных зависимостей [65,34].

Для формирования математических функций отклика  $\hat{y}$  – функциональной зависимости свойства системы от  $k$  влияющих факторов  $x_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) при построении матрицы эксперимента значения факторов в натуральных величинах  $x_i$  переводятся в безразмерные кодированные значения  $X_i = (x_i - x_{i\text{cp}}) / \Delta x_i$ , где  $x_{i\text{cp}}$  – среднее значение фактора в диапазоне варьирования,  $\Delta x_i = (x_{i\text{max}} - x_{i\text{min}}) / 2$  – диапазон варьирования фактора.

Например, плане полного факторного эксперимента (ПФЭ) кодированные факторы изменяются в пределах диапазона варьирования и принимают в вычислительных экспериментах или опытах один из двух уровней (кодированных значений)  $+1$  или  $-1$ . Число экспериментов  $N$  для плана ПФЭ при  $k$  факторах составляет  $N = 2^k$ . Графически план ПФЭ  $2^k$  может быть представлен

в виде единичного куба (гиперкубу). Для каждой точки плана вычислительным экспериментом или опытно определяется значение свойства системы  $y$ . Для планов ПФЭ  $2^k$  формируется линейная модель функции отклика с  $N$  членами. Например, для плана ПФЭ  $2^3$  при 8 опытах можно сформировать полином первой степени с числом членов 8 совпадающим с числом опытов 8.

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (3.26)$$

Такой план называется насыщенным.

По коэффициентам  $b_i$  при членах уравнения в кодированных факторах возможно судить о степени и направлении влияния факторов на функцию отклика. Если коэффициент члена полинома с кодированными факторами положителен, то возрастание фактора увеличивает значение функции, и наоборот. Величина коэффициентов членов полинома с кодированными факторами указывает на степень влияния фактора на функцию.

Линейный полином, сформированный по результатам опытов в вершинах квадрата (куба, гиперкуба) дает высокую точность определения функции в этих вершинах. Однако в других точках факторного пространства, часто в центре факторного пространства, может наблюдаться погрешность определения функции. Это возникает при нелинейных зависимостях функции от факторов, что не учитывает линейный полином и характерно для планов ПФЭ.

Для учета нелинейного влияния факторов, возможно сформировать полином 2 степени (нелинейный) с помощью, например, рототабельного плана. У рототабельных планов второго порядка точки плана располагаются на двух концентрических окружностях (сферах, гипертсферах), радиус одной из них может быть нулевым. Достоинство рототабельных планов в том, что оценка точности функции отклика по любому направлению факторного пространства одинаковая, т.е. дисперсия отклика одна и та же на одном расстоянии от центра плана при любом направлении, что обеспечивает одинаковую точность определения коэффициентов полинома. Эффективны рототабельные центрально-ортогональные планы второго порядка с точками плана в вершинах правильного многоугольника (многогранника), вписанного в область

единичного круга (шара, гипершара), и центральной точкой, например, на основе правильного пятиугольника (рис. 3.8).

Параметры таких планов приведены в [34]. Единичная область планирования позволяет сохранить диапазон варьирования факторов и не выходить за его пределы, что может возникать при формировании композиционных планов. На основе плана второго порядка для двух факторов формируется полином 2 степени с 6 членами

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 . \quad (3.27)$$

В отличие от других планов второго порядка, например, ортогонального центрально-композиционного плана, для которого при двух факторах требуется проведение 9 вычислительных экспериментов или опытов, или рототабельного плана на основе шести-, семиугольников, для которых при двух факторах требуется проведение 7 или 8 экспериментов, рототабельный план на основе пятиугольника будет «насыщенным», т.е. число экспериментов (число точек плана) - 6 соответствует числу членов уравнения - 6. Это позволяет максимально снизить число опытов, что важно при проведении многофакторных экспериментов или при сложных алгоритмах расчета функции отклика.

Преобразовывая полученный полином путем замены кодированных факторов именованными факторами в виде соотношения  $(x_i - x_{i\text{cp}})/\Delta x_i$  можно сформировать полином с факторами в натуральных величинах

$$\hat{y} = B_0 + Bx_1 + Bx_2 + Bx_3 + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + B_{23}x_2x_3 + B_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.28)$$

или 
$$\hat{y} = B_0 + B_1x_1 + Bx_2 + B_{12}x_1x_2 + B_{11}x_1^2 + B_{22}x_2^2 . \quad (3.29)$$

Таким образом на основе методов планирования эксперимента возможно формирование математических моделей системных связей системы в виде полиномов, которые могут реализовываться в качестве задающих функций

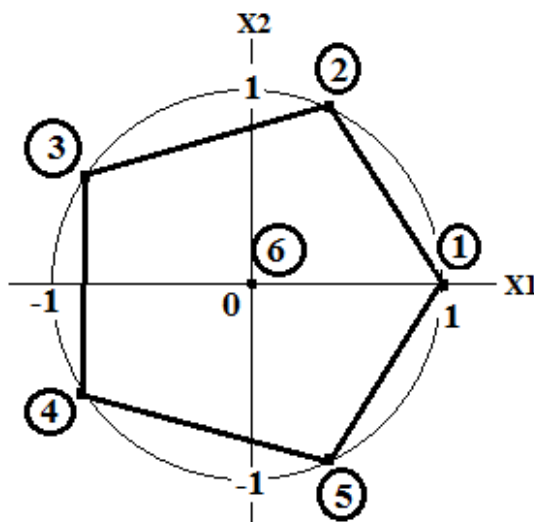


Рис. 3.8. Рототабельный центрально-ортогональный насыщенный план второго порядка в виде правильного пятиугольника с единичной областью планирования для двух факторов

регуляторов в системе. Применение рассмотренных планов для формализации системных связей будет рассмотрено в главах 4 и 5.

### 3.4. Имитационные модели и программа моделирования электротехнической системы магнитожидкостной герметизации

Изложенный алгоритм в виде блок-схемы программы управления токами в обмотках МЖГ в зависимости от сигналов датчиков внешнего воздействующего перепада давлений, частоты вращения вала при контроле температуры МЖ представлен на рис. 3.9. На основе алгоритма в системе LabVIEW [12], которая имеет библиотеку компонентов моделирования, математических методов обработки данных и применяется в системах сбора и обработки данных, управления техническими объектами, с использованием моделей системных связей системы в виде полиномов, разработаны имитационные модели системы регулирования токов  $I_n$  и  $I_r$  в обмотках МЖГ по  $\Delta p_{\text{внеш}}$  и  $T_{\text{мж}}$  (рис. 3.10) и по  $n$  (рис. 3.11).

На основе алгоритма и имитационных моделей составлена и зарегистрированная программа управления системой магнитожидкостной герметизацией валов [66], которая изменяет режим работы МЖГ в зависимости от сигналов датчиков  $\Delta p_{\text{внеш}}$ ,  $n$  при контроле  $T_{\text{мж}}$ . На рис. 3.12 представлен рабочий интерфейс программы.

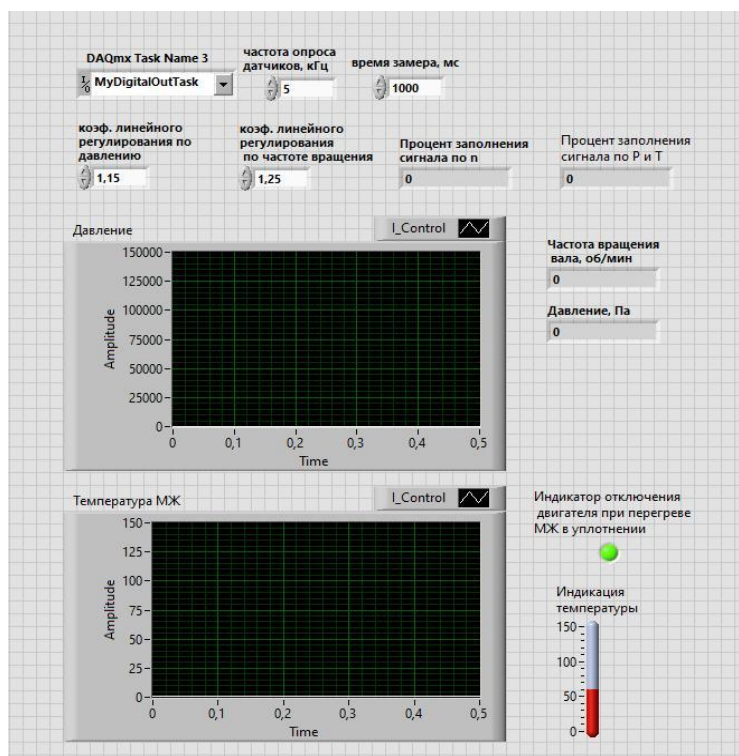


Рис. 3.12. Рабочий интерфейс программы управления системой магнитожидкостной герметизацией валов

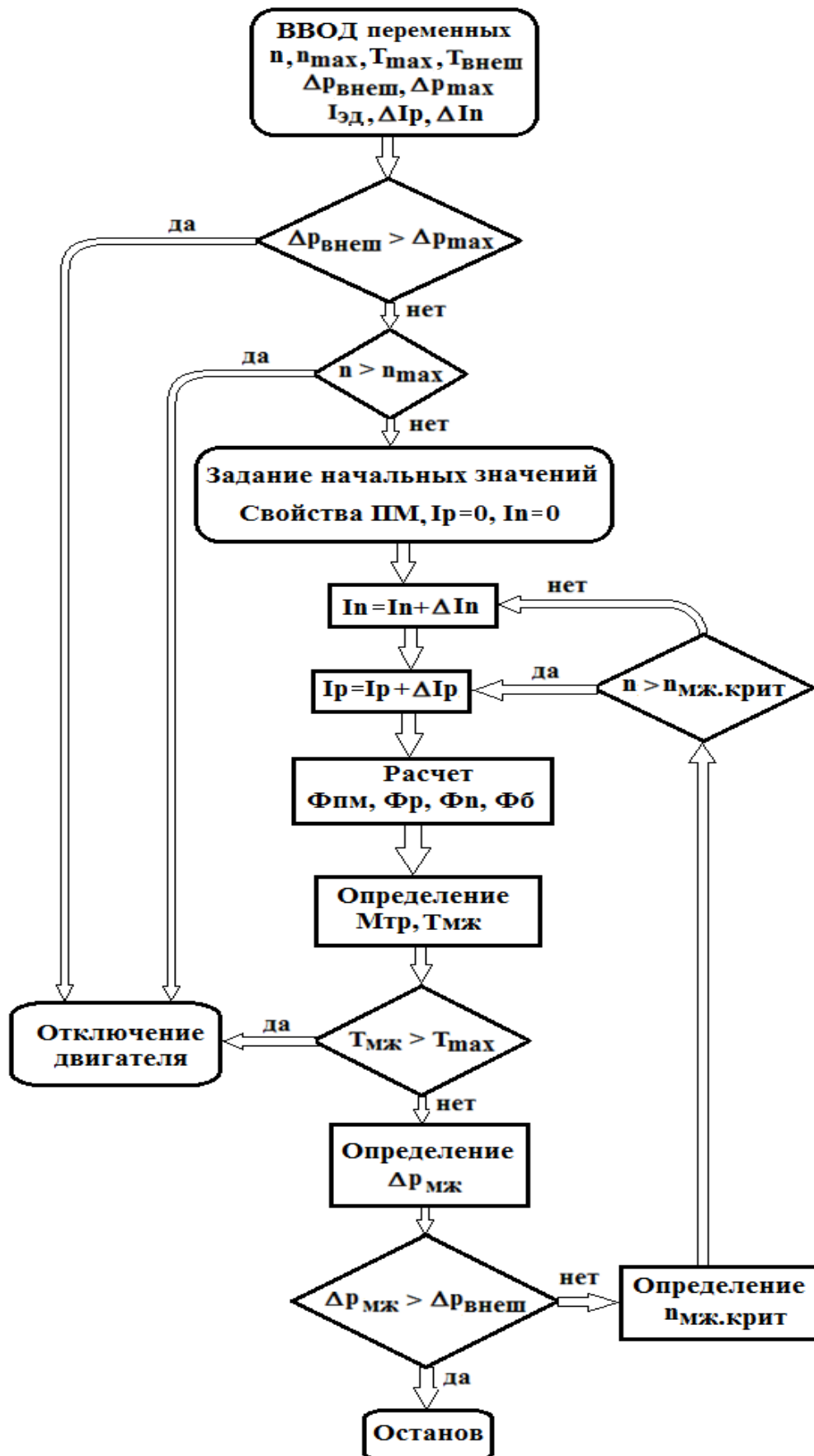


Рис. 3.9. Алгоритм в виде блок-схемы программы управления токами в обмотках МЖГ в зависимости от сигналов датчиков внешнего воздействующего перепада давления, частоты вращения вала при контроле температуры МЖ

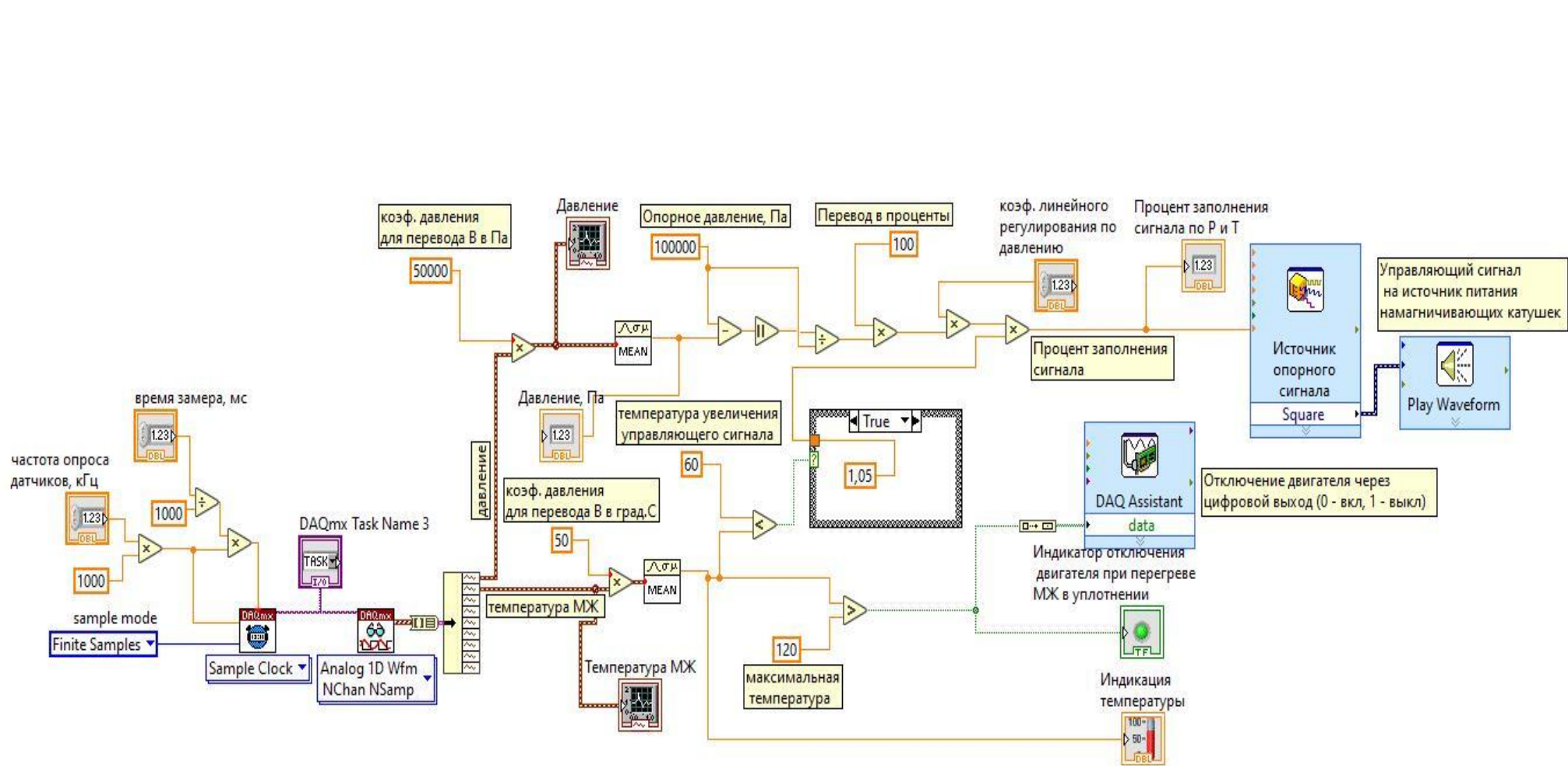


Рис. 3.10. Имитационная модель системы регулирования напряжения на намагничивающих катушках МЖГ по внешнему воздействию перепада давления и температуре в программном комплексе LabVIEW





Рис. 3.11. Имитационная модель системы регулирования напряжения на намагничивающих катушках МЖГ по частоте вращения вала в программном комплексе LabVIEW

### 3.5. Выводы

1. Выполнен анализ системных связей в системе, сформированы математические зависимости вязкости МЖ от скорости сдвига слоев МЖ, воздействующей индукции магнитного поля и температуры. Установлено, что на работу и свойства МЖГ влияют электромагнитные процессы в электродвигателе, оказывается электромагнитное воздействие на МЖ, происходит перераспределение потоков энергии при покрытии потерь в МЖГ. В регулируемых электродвигателях, при изменении режима работы влияние электромагнитных процессов в электродвигателе изменяется.

2. Обоснованные условия регулирования, разработанная математическая модель и алгоритм формирования управляющих воздействий в электротехнической системе позволяют в зависимости от режима работы электродвигателя реализовывать корректное управление свойствами магнитожидкостных герметизаторов.

3. Показано, что для формализации нелинейных системных связей элементов с учетом их взаимного влияния, описания многофакторных зависимостей в электротехнической системе магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей эффективно применение усовершенствованных планов факторного эксперимента при минимальном числе трудоемких вычислительных экспериментов или опытных данных. Сформированные на основе методов планирования эксперимента математические модели системных связей системы в виде полиномов могут реализовываться в качестве задающих функций регуляторов в системе.

4. Разработанные имитационные модели и программа управления электротехнической системой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей позволяют моделировать работу системы при изменении частоты вращения, перепада давлений и температуры и обеспечивают автоматизированное управление свойствами МЖГ в зависимости от режима работы электродвигателя.

## **4. УТОЧНЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Момент трения, удерживаемый перепад давлений и нагрев - важнейшие эксплуатационные показатели системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, на которые влияют конструкция МЖГ и электродвигателя, режим и условия работы: материал подшипникового щита и корпуса МЖГ, ориентация постоянного магнита МЖГ, частота вращения вала, нагрузка электродвигателя, внешняя температура, воздействующий внешний перепад давлений, время работы, шероховатость поверхностей вала и полюсов.

### **4.1. Моделирование и анализ магнитного поля МЖГ с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе**

Для взрывозащищенного трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором тип ВРАБ Ярославского электромашиностроительного завода «ЭЛДИН» с высотой оси вращения 225 мм, напряжением 220/380 В, мощностью 37 кВт при числе полюсов  $2p=4$  и установленным в наружной крышке подшипника МЖГ со своим корпусом выполнено конечно-элементное моделирование магнитного поля в торцевой зоне двигателя с лобовыми частями обмоток. Подшипниковый щит в таких электродвигателях для повышенной прочности выполняется чугуном или даже стальным с хорошей магнитной проводимостью, что будет приводить к повышенному магнитному потоку торцевого рассеяния лобовых частей обмоток статора и ротора Фб. В магнитном отношении расчет и анализ распределения магнитного поля с учетом нелинейности магнитных характеристик материалов, распределённости вектора намагниченности по магниту МЖГ, намагничивающих сил обмоток целесообразно проводить численными методами в распространенных программных комплексах, например, комплексах конечно-элементного моделирования ElCut [84], FEMlib [25,71].

Анализ магнитного поля в торцевой зоне электродвигателя [10,20] с МЖГ проводился на основе решения дифференциальных уравнений Максвелла

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J}; \operatorname{div} \vec{B} = 0; \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{d\vec{B}}{dt}, \\ \vec{J} &= \gamma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \vec{B} = \mu(H) \vec{H}; \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Здесь  $B, H, E, J$  – векторы индукции, напряженностей магнитного и электрического полей, плотности тока;  $\gamma$  – электропроводность;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $A$  – векторный магнитный потенциал.

Проведено исследование влияния электромагнитных процессов в двигателе на свойства МЖГ при нагрузках АД от режима ХХ до режима КЗ (режим пуска). Номинальный фазный ток двигателя  $I_{1H} = 67$  А, амплитудный  $I_{1M} = 94,75$  А. При числе пазов статора  $z_1 = 48$ , число пазов на полюс и фазу  $q = 4$ , полюсное деление – 12 пазов. Обмотка двухслойная, шаг обмотки с укорочением  $y = 10$  (рис. 4.1). При  $a = 4$  параллельных ветвях в пазу размещено  $U_{\Pi} = 26$  эффективных проводников [59]. Намагничивающие силы катушек в верхнем и нижнем слоях паза при номинальной нагрузке  $I_{1M} \sin(\omega t) U_{\Pi} / (2a) = 308 \sin(\omega t)$  А.

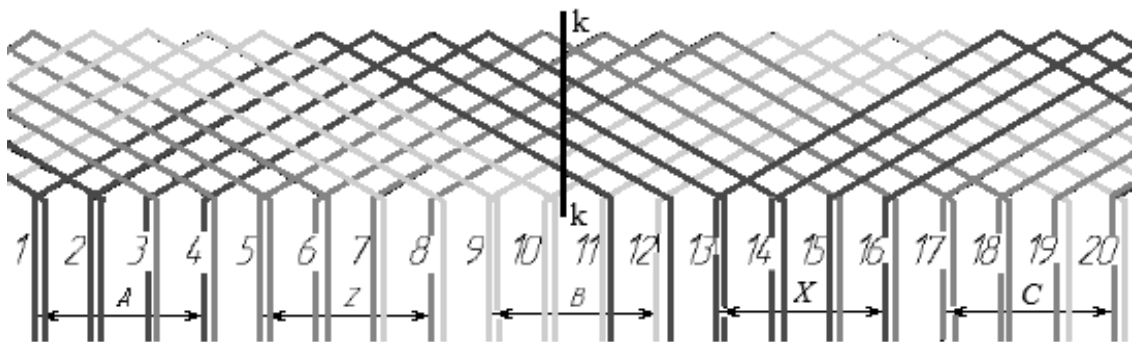


Рис. 4.1. Часть схемы обмотки статора

В сечении k-k по лобовым частям обмотки пересекаются стороны катушек фазных зон: В, А, В, А, Z, А, Z, А, Z, Z. Эти катушки формируют намагничивающую силу лобовых частей обмотки в сечении k-k. При 6-ти лучевой звезде токов (рис. 4.2) для номинальной нагрузки намагничивающая сила лобовых частей катушек составит:  $F_{1AH} = +308$  А;  $F_{1BH} = -154$  А;  $F_{1ZH} = +154$  А. При номинальной нагрузке намагничивающая сила лобовой части обмотки статора в сечении k-k составит

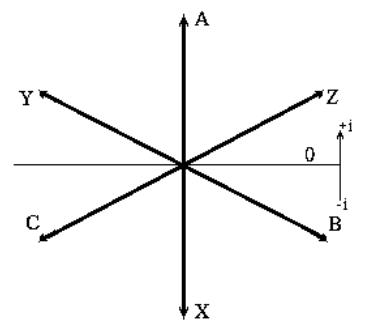


Рис. 4.2. Звезда токов фаз

$$\sum F_{1\text{Лоб.к-кН}} = -154 + 308 - 154 + 308 + 154 + 308 + 154 + 308 + 154 + 154 = +1540 \text{ А.} \quad (4.2)$$

В режиме “идеального” ХХ тока в обмотке ротора нет, в обмотке статора протекает намагничивающий ток  $I_{10} \sim 0,2I_{1Н}$ . В режиме нагрузки в лобовой части обмотки ротора (в КЗ кольце) ее намагничивающая сила  $\sum F_{2\text{Лоб.к-кН}}$  направлена практически встречно  $\sum F_{1\text{Лоб.к-кН}}$  и уравнивает ее в пределах  $I_{10}$ . Однако, так как лобовые части обмоток статора и ротора разнесены в пространстве, возникают торцевые потоки рассеяния лобовых частей обеих обмоток. В режиме пуска (режим КЗ) пусковой ток в 7,0 раз превышает номинальный ток, намагничивающий ток в режиме практически отсутствует, т.е.  $I_{10КЗ} \sim 0 \text{ А}$ . Тогда

$$\sum F_{1\text{Лоб.к-кП}} = 10780 \text{ А, и } \sum F_{2\text{Лоб.к-кП}} = -10780 \text{ А.} \quad (4.3)$$

Расчетная модель плоскомеридианного сечения осесимметричной торцевой зоны двигателя ВРАБ225 с лобовыми частями обмоток статора и ротора, подшипником, щитом, крышек и МЖГ представлена на рисунке 4.3.

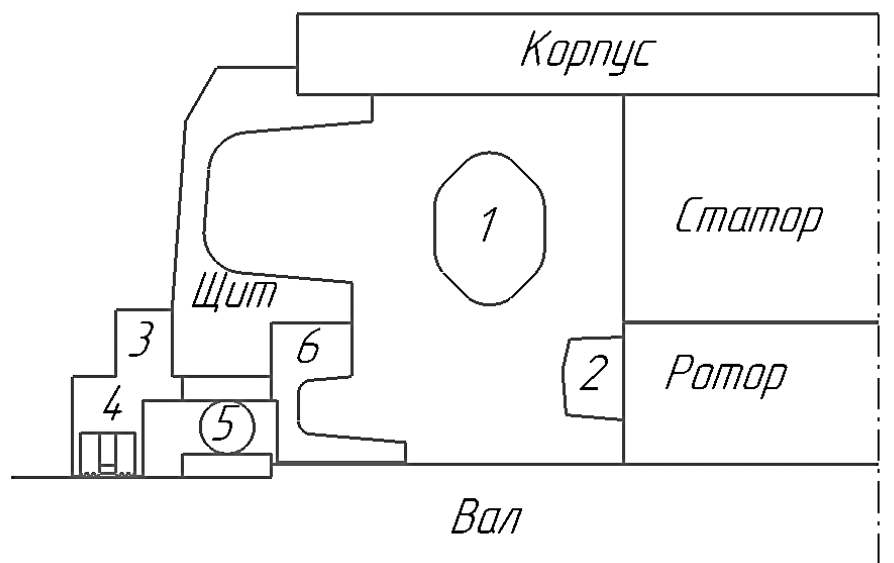


Рис. 4.3. Расчетная модель торцевой зоны электродвигателя ВРАБ225:

1 – лобовая часть обмотки статора; 2- КЗ кольцо ротора; 3 – наружная крышка подшипника с корпусом МЖГ; 4 – МЖГ; 5 – подшипник; 6 – внутренняя крышка подшипника

Взрывозащищенность двигателя обеспечивается, в том числе, удлиненным посадочным местом подшипникового щита в корпус, применением МЖГ и удлиненным щелевым зазором между внутренней крышкой подшипника и валом. В МЖГ использован магнит с коэрцитивной силой  $H_{CB} = 185 \text{ кА/м}$  и остаточной индукцией  $B_r = 0.3 \text{ Тл}$ . Конструкция МЖГ и распределение линий магнитного

потока самого МЖГ представлены на рисунке 4.4.

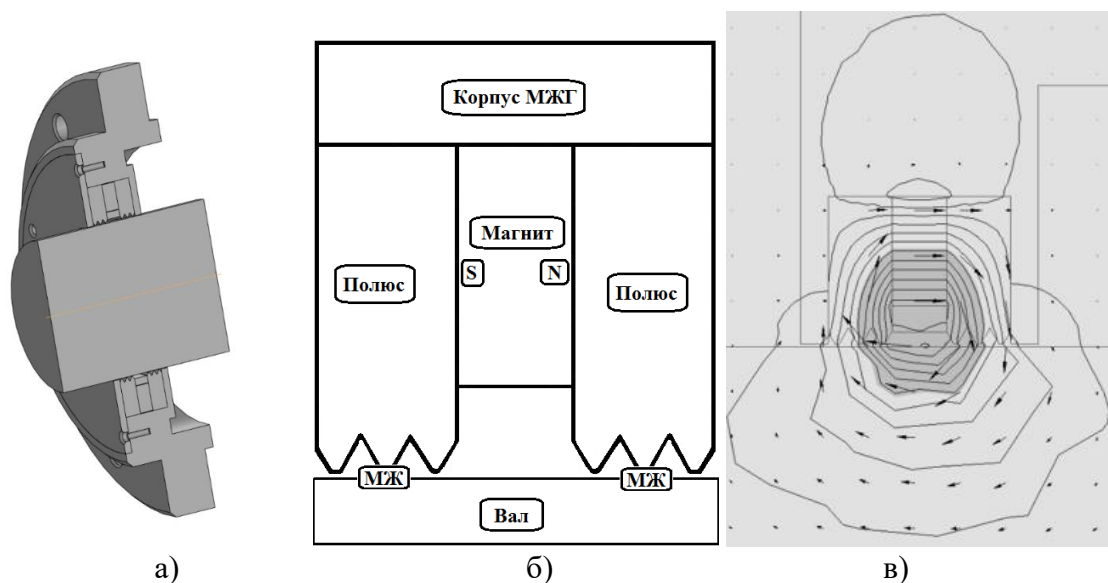


Рис. 4.4. МЖГ электродвигателя: а – конструкция; б – расчетная модель; в – распределение линий магнитного потока в МЖГ

Расчетные модели торцевой зоны двигателя (рис. 4.5) содержали сетку конечных элементов с переменной густотой, крупные элементы задавались в областях с небольшими изменениями параметров магнитного поля, мелкие - в зазоре со стороной элемента до 0.002 мм. Число узлов сеток доходило до 1 миллиона. Расчет магнитного поля проводился на ПК и занимал до 6 минут времени [53,54].

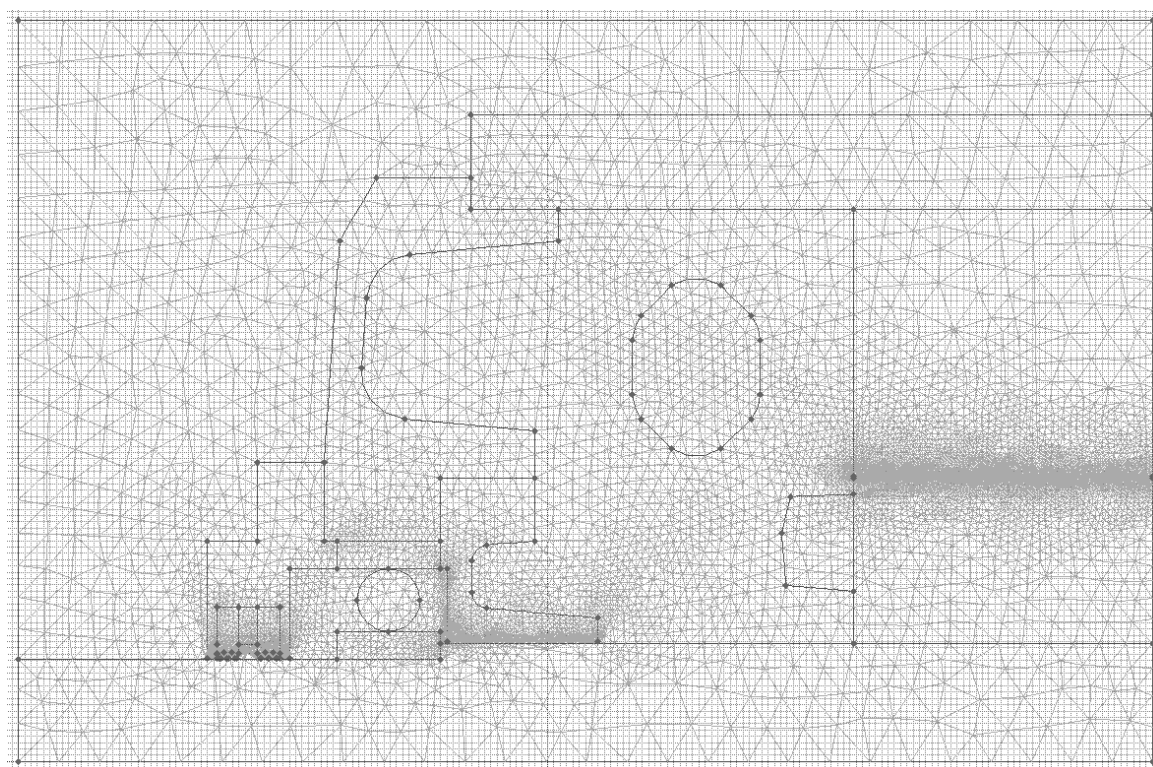


Рис. 4.5. Расчетная сетка торцевой зоны электродвигателя BRAБ225

При расчетах магнитных полей в торцевой зоне электродвигателя и значений  $\Phi_b$  принимались намагничивающие силы для режимов электродвигателя:

- режим XX:  $\sum F_{1\text{Лоб.к-кXX}} = 20 \% \sum F_{1\text{Лоб.к-кН}} = 0,2 \cdot 1540 = 308 \text{ А}, \sum F_{2\text{Лоб.к-кXX}} = 0 \text{ А};$
- режим номинальной нагрузки:  $\sum F_{1\text{Лоб.к-кН}} = 1540 \text{ А}, \sum F_{2\text{Лоб.к-кН}} = -1232 \text{ А};$
- режим пуска (КЗ):  $\sum F_{1\text{Лоб.к-кП}} = 10780 \text{ А}, \sum F_{2\text{Лоб.к-кП}} = -10780 \text{ А}.$

На рисунке 4.6 представлено распределение в режимах XX и номинальной нагрузки линий магнитного потока торцевого рассеяния  $\Phi_b$  электродвигателя с чугунным подшипниковым щитом и немагнитным корпусом МЖГ без учета и с учетом влияния постоянного магнита МЖГ.

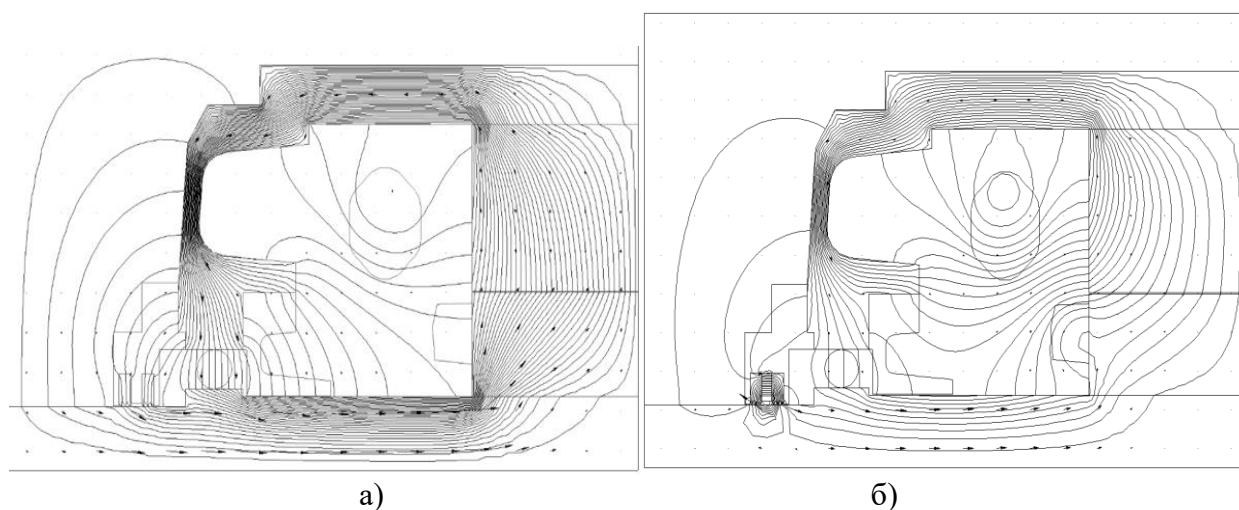


Рис. 4.6. Распределение линий  $\Phi_b$  в торцевой зоне электродвигателя ВРАБ225 (подшипниковый щит – чугун, корпус МЖГ – немагнитный):

- а - режим XX электродвигателя без учета влияния постоянного магнита МЖГ;
- б - номинальный режим электродвигателя с учетом действия постоянного магнита МЖГ

Из анализа распределений линий магнитного потока следует, что часть  $\Phi_b$  замыкается через МЖГ и влияет на его свойства. Изменение нагрузки электродвигателя, приводящее к изменению токов в обмотках статора и ротора, перераспределяет  $\Phi_b$  и изменяет долю  $\Phi_b$ , проникающего в зону МЖГ. В самом МЖГ поток  $\Phi_b$  накладывается на магнитное поле самого МЖГ.

Изменение функции магнитного потока  $\Phi_b$  электродвигателя в режиме XX на единицу длины окружности в МЖГ вдоль зазора  $L$  без учета влияния постоянного магнита МЖГ (подшипниковый щит электродвигателя – конструкционная сталь, корпус МЖГ – немагнитный) представлено на рисунке 4.7. Магнитный поток  $\Phi_b$  электродвигателя, проникающий в зону МЖГ на единицу длины



окружности по зазору, определяется разностью значений функции потока на границах МЖГ ( $\Phi_{бн}$ ,  $\Phi_{бк}$ ) по длине зазора  $L$ , т.е.

$$\Phi_{б} = \Phi_{бк} - \Phi_{бн}. \quad (4.4)$$

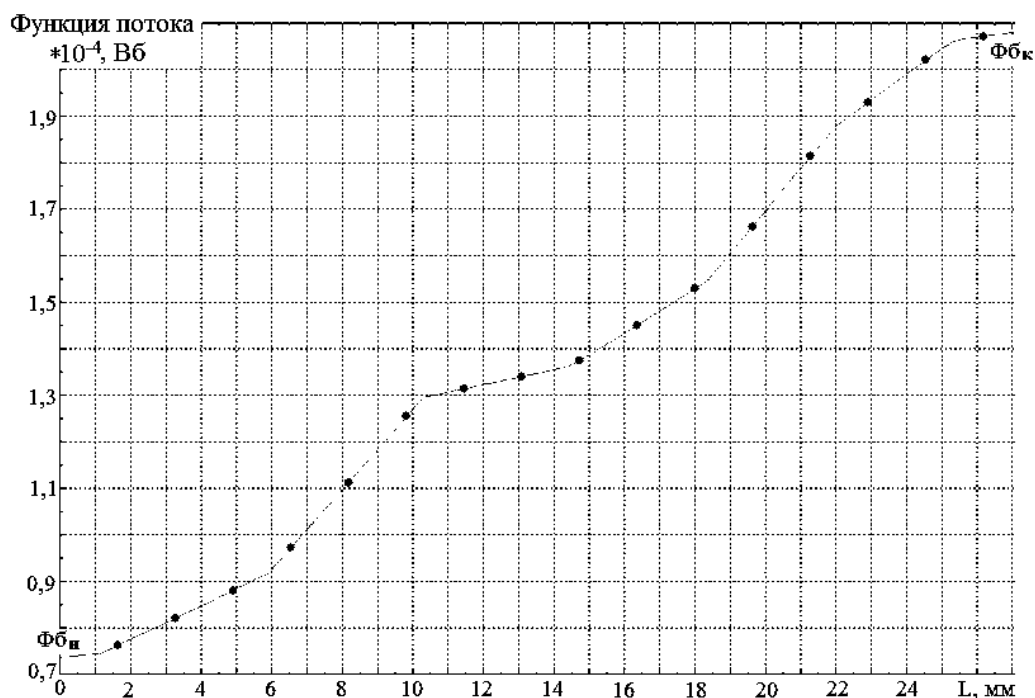


Рис. 4.7. Изменение функции потока  $\Phi_{б}$  электродвигателя в режиме ХХ на единицу длины окружности в зоне МЖГ вдоль зазора без учета влияния постоянного магнита МЖГ (подшипниковый щит – конструкционная сталь, корпус МЖГ – немагнитный)

Из анализа результатов расчетов выявлено, что если подшипниковый щит электродвигателя выполнить из немагнитного материала, а не из чугуна, то доля  $\Phi_{б}$ , проникающая в зону МЖГ, уменьшится в 1,8 раза. Если подшипниковый щит электродвигателя для повышения прочности выполнить из конструкционной стали, то доля  $\Phi_{б}$ , наоборот, возрастет на 2,36 %.

Если при чугунном подшипниковом щите электродвигателя корпус МЖГ выполнить также из чугуна, то доля  $\Phi_{б}$ , проникающая в зону МЖГ, увеличится на 13,6 %, по сравнению с немагнитным корпусом МЖГ. При корпусе МЖГ выполненном из конструкционной стали для повышения прочности доля  $\Phi_{б}$ , проникающая в зону МЖГ, увеличится в 1,82 раза, по сравнению с немагнитным корпусом МЖГ, что увеличит влияние  $\Phi_{б}$  на МЖ.

Изменение  $\Phi_{б}$ , проникающего в зону МЖ для разных конструкций МЖГ, при изменении нагрузки и токов в обмотках статора и ротора электродвигателя, представлено на рисунке 4.8.



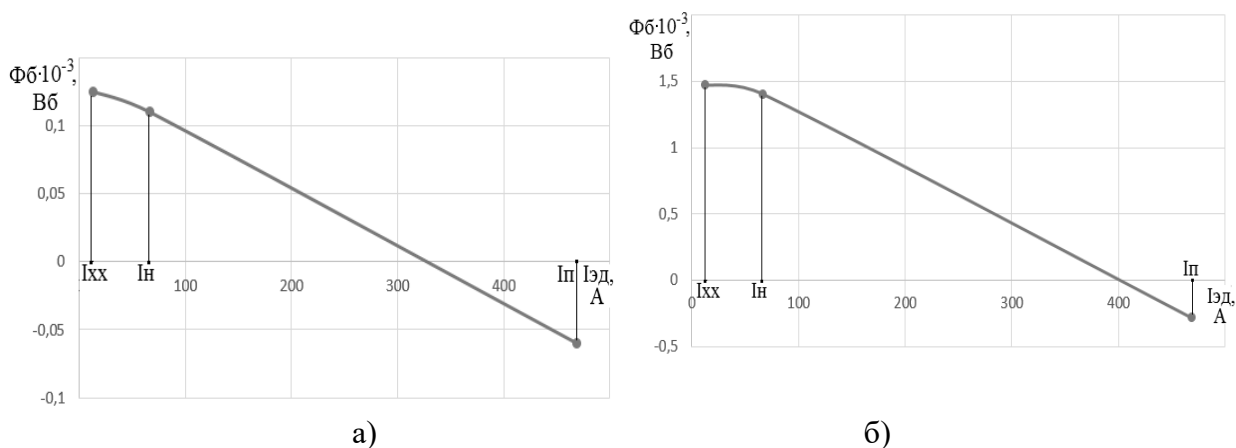


Рис. 4.8. Изменение  $\Phi_b$  в зоне МЖГ с изменением нагрузки электродвигателя с чугунным подшипниковым щитом:

- а - МЖГ с осевой намагниченностью магнита (корпус МЖГ – чугун);
- б - МЖГ с радиальной намагниченностью магнита (корпус МЖГ – конструкционная сталь)

С ростом нагрузки электродвигателя  $\Phi_b$  в зоне МЖГ снижается и в режиме пуска электродвигателя даже может изменить знак. Изменение направления потока  $\Phi_b$  в режиме пуска (отрицательный  $\Phi_b$ ), при взаимном уравнивании намагничивающих сил обмоток статора и ротора и резким снижением магнитного потока взаимоиндукции, обусловлено более близким расположением МЖГ к лобовой части обмотки ротора, по сравнению с расположением лобовой части обмотки статора.

Для МЖГ с осевой намагниченностью магнита с чугунным подшипниковым щитом и чугунным корпусом МЖГ  $\Phi_b$ , проникающий в зону МЖ, может быть аппроксимирован линейным соотношением

$$\Phi_b = 0,0001339 - 0,0004I_{эд} . \quad (4.5)$$

Распределение индукции в середине зазора вдоль осевой длины МЖГ  $L$  с учетом влияния  $\Phi_b$  электродвигателя в режиме ХХ представлено на рисунке 4.9.

Зубчатость полюсных приставок проявляется в всплесках индукции. Так как в конструкции МЖГ с осевой намагниченностью магнита МЖГ полюсные приставки имеют разную полярность, то магнитный поток торцевого рассеяния электродвигателя  $\Phi_b$  усиливает индукцию в зазоре МЖГ под одной полюсной приставкой и ослабляет под другой. Различие  $B_{max}$  под разными полюсными приставками достигает 14 %. Этот эффект аналогичен действию реакции якоря в

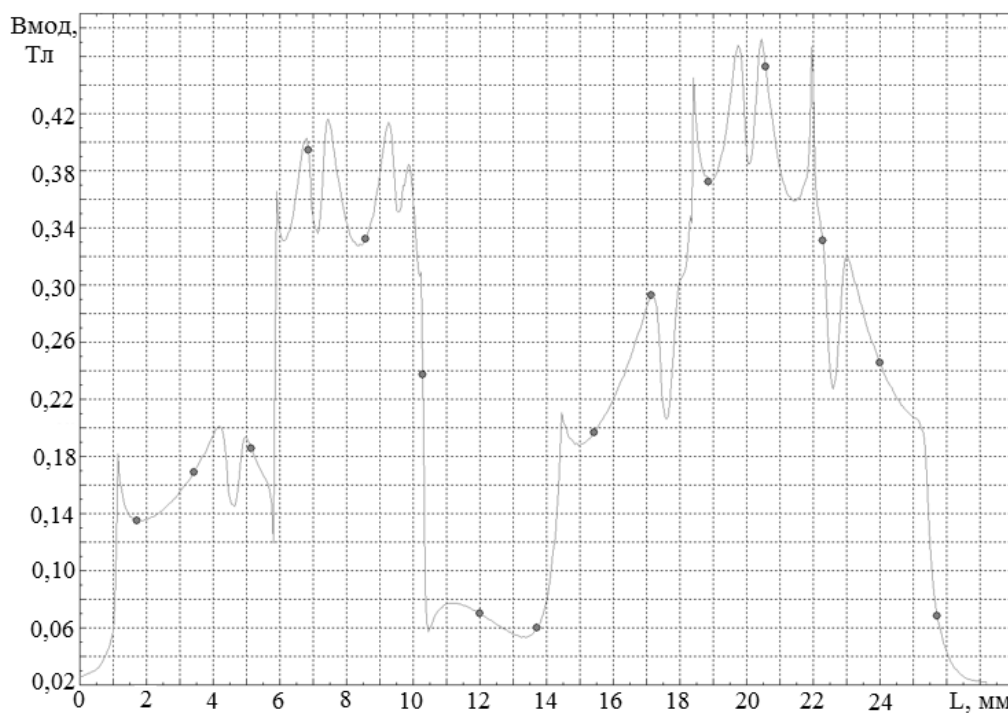


Рис. 4.9. Распределение индукции в зазоре МЖГ с немагнитным корпусом и учетом влияния Фб в режиме ХХ электродвигателя с чугунным подшипниковым щитом

ЭМ, что приводит к размагничиванию МЖГ до 4,0 %. Так как критический удерживаемый МЖГ перепад давлений определяется, в том числе, максимальной индукцией, то одна полюсная приставка будет удерживать несколько больший перепад давлений, другая – меньший. Разница удерживаемых перепадов давлений определяется степенью влияния Фб. Наличие шарикоподшипника из-за шунтирования рабочего зазора снижает  $V_{max}$  в зазоре до 4,3 %.

Так как с ростом нагрузки электродвигателя снижается Фб, проникающий в МЖГ, то снижается и отличие максимальных индукций в зазоре МЖГ под разными полюсными наконечниками. При номинальной нагрузке отличие максимальных индукций в зазоре МЖГ под разными полюсными наконечниками снижается до 13 %. В режиме пуска (КЗ) электродвигателя Фб, проникающий в МЖГ, меняет знак. Поэтому усиливается индукция в зазоре МЖГ под другой полюсной приставкой, а под первой полюсной приставкой индукция ослабляется. Различие максимальных индукций в зазоре МЖГ под разными полюсными наконечниками в режиме пуска электродвигателя достигает -9 %.

Так как Фб вращается с синхронной частотой, в том числе в зазоре МЖГ, а магнитный поток МЖГ  $\Phi_{pm}$  неподвижен, то периодически с течением времени

в одном месте по окружности зазора под одной полюсной приставкой будет то усиливаться магнитная индукция, то ослабляться. Под другой полюсной приставкой наоборот. В другом месте по окружности зазора, через полюсное деление электродвигателя, явление меняется на обратное.

Из анализа результатов расчетов магнитных полей для конструкции МЖГ с радиальной намагниченностью магнита и корпусом МЖГ из конструкционной стали выявлено, что  $\Phi_b$ , проникающий в зону МЖ, увеличивается более чем в 10 раз, по сравнению с конструкцией МЖГ с осевой намагниченностью и немагнитном корпусе МЖГ. В первом приближении для конструкции МЖГ с радиальной намагниченностью магнита с корпусом МЖГ из конструкционной стали изменение  $\Phi_b$  может быть аппроксимировано линейным соотношением

$$\Phi_b = 0,001591 - 0,004I_{эд} . \quad (4.6)$$

Существенно большая величина  $\Phi_b$  в конструкции МЖГ с радиальной намагниченностью магнита и корпусом МЖГ из конструкционной стали будет значительно сильнее изменять магнитную индукцию в зазоре МЖГ и в некоторых режимах может даже превышать индукцию от магнита МЖГ. Более того в конструкции МЖГ с радиальной намагниченностью магнита обе полюсные приставки имеют одну полюсность. Поэтому  $\Phi_b$  в такой конструкции будет одновременно или усиливать магнитную индукцию в зазоре МЖГ под обеими полюсными приставками или одновременно уменьшать магнитную индукцию под ними. Для некоторых конструкций в определенных режимах индукция в зазоре МЖГ может снижаться вплоть до нуля и даже изменять знак. Так как  $\Phi_b$  вращается, то в конкретный момент времени в некоторых точках по окружности зазора МЖГ будет максимальная индукция, возможно до 2 раз, а в других точках, на расстоянии полюсного деления электродвигателя, минимальная или даже нулевая. Это нарушит герметизацию электродвигателя, так как пробой МЖГ произойдет в зоне ослабленной индукции. Поэтому конструкция МЖГ с радиальной намагниченностью магнита и корпусом из конструкционной стали не рациональна к применению для герметизации электродвигателей.

## 4.2. Расчетное исследование влияния регулирующей обмотки на МЖГ

Выше показано, что изменение нагрузки электродвигателя, вызывает изменение токов в обмотках, в том числе в лобовых частях, и изменение электромагнитных процессов в двигателе, в том числе в торцевой зоне, что влияет на магнитное состояние МЖГ. Такое же влияние могут оказывать специальные регулирующие токовые обмотки, воздействующие на МЖГ вне зависимости от нагрузки электродвигателя.

Влияние регулирующей токовой обмотки на свойства МЖГ оценено при сравнении результатов конечно-элементного моделирования магнитного поля тестовой модели МЖГ с постоянным магнитом и управляемого МЖГ с магнитом и регулирующей обмоткой. Модель МЖГ без обмотки содержит (рис. 4.10а) магнит с коэрцитивной силой  $H_{CB} = 185$  кА/м и остаточной индукцией  $B_r = 0.3$  Тл, немагнитный внешний корпус, две полюсные стальные приставки без зубцов. Расчетная сетка модели представлена на рисунке 4.10б.

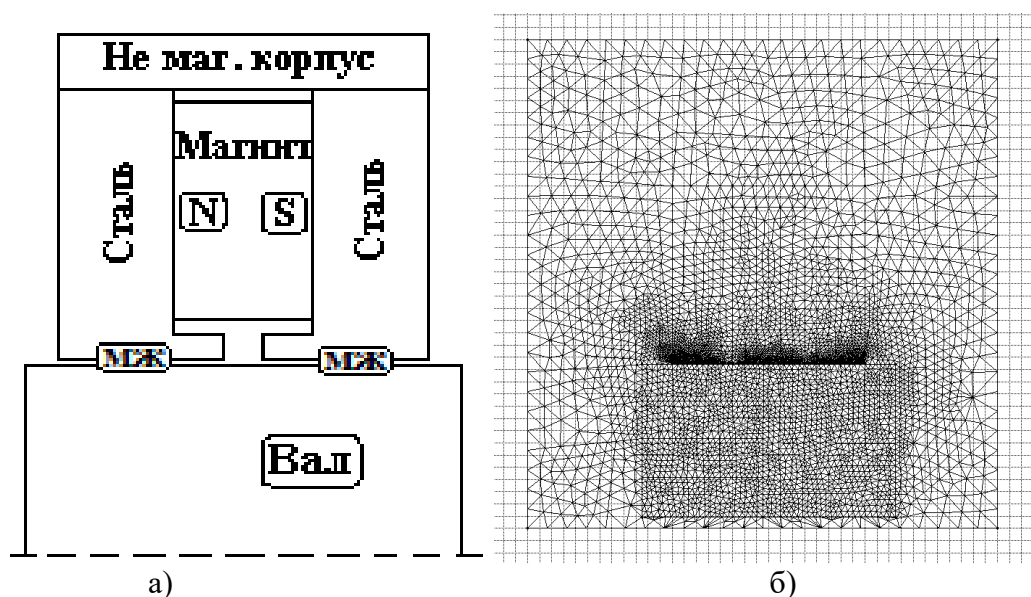


Рис. 4.10. Конструкция (а) и расчетная сетка (б) тестовой модели регулируемого МЖГ

На рисунке 4.11 представлено распределение линий магнитного потока в МЖГ и модуля магнитной индукции  $B$  по середине зазора. Из распределения следует, что индукция равномерно распределяется между полюсными приставками, амплитуда индукции достигает 0,47 Тл.

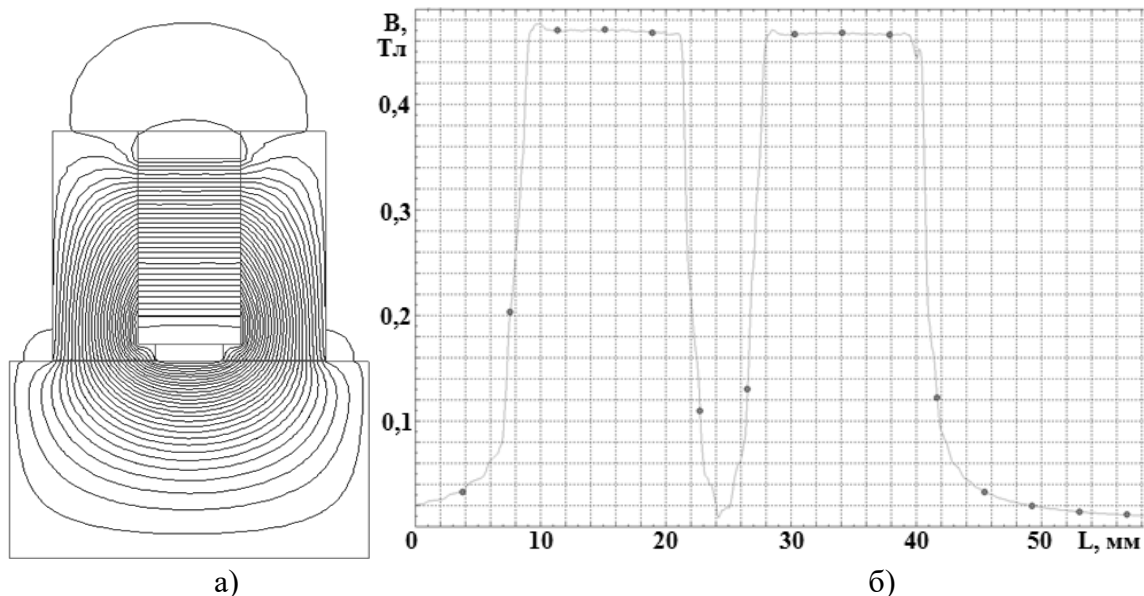


Рис. 4.11. Распределение линий магнитного потока в МЖГ без обмотки (а) и модуля индукции магнитного поля в зазоре (б)

Модель управляемого МЖГ содержит тот же, что и ранее, постоянный магнит, три полюсные стальные приставки без зубцов и регулируемую токовую обмотку, охватывающую вал (рис. 4.12). Расчеты проводились при изменении направления действия и величины магнитодвижущей силы (МДС)  $IW$  обмотки в диапазоне от -200 А до +200 А. Распределение линий магнитного потока в МЖГ и нормальной составляющей магнитной индукции по середине зазора при  $IW = 0$  А, т.е. отсутствии действия обмотки, но действии магнита МЖГ представлено на рисунке 4.13. Магнитный поток с правой стороны МЖГ замыкается через две полюсные приставки, с левой стороны – через одну. Вследствие уменьшения общего магнитного сопротивления магнитной системы – три полюсные приставки, по сравнению с двумя в предыдущем примере, амплитуда индукции достигает 0,5 Тл.

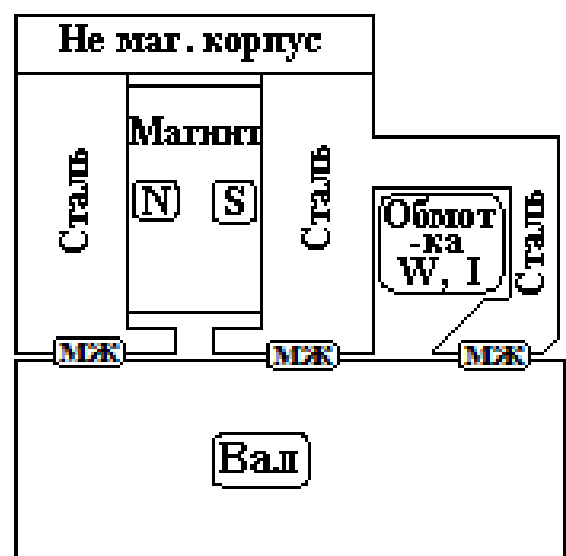


Рис. 4.12. Расчетная модель управляемого МЖГ

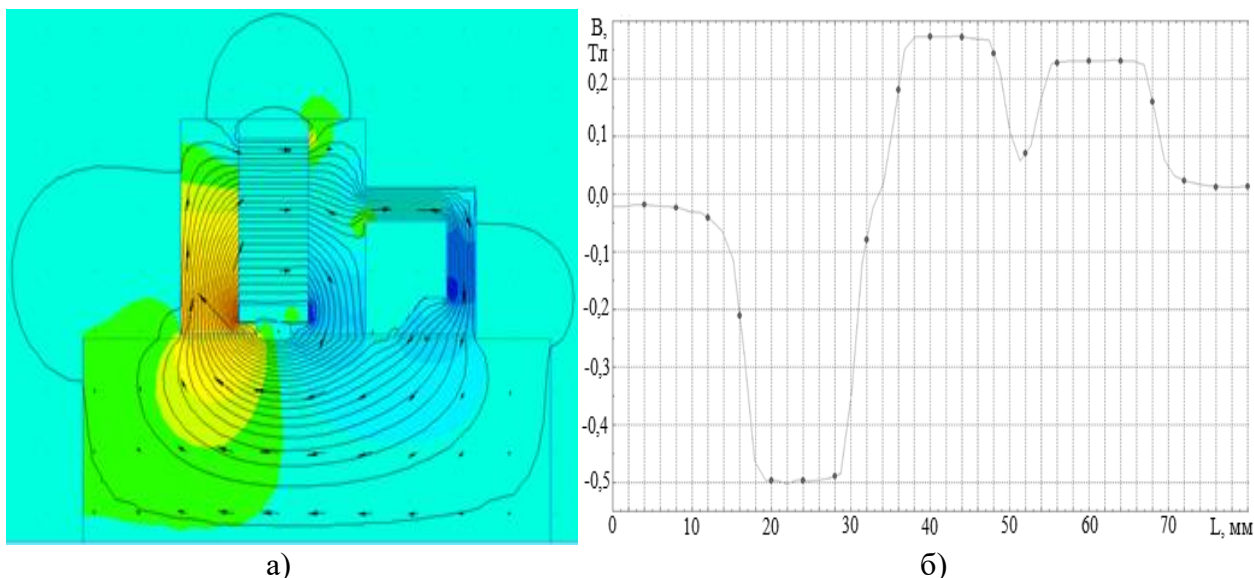


Рис. 4.13. Распределение линий магнитного потока в МЖГ при  $I = 0$  А (а) и нормальной составляющей индукции магнитного поля в зазоре (б)

Изменение направления и величины тока в обмотке  $I$  изменяет направление действия и величину МДС обмотки. МДС обмотки может быть направлена разным образом по отношению к МДС магнита, по-разному взаимодействовать с ним. На рисунке 4.14 представлены распределения линий магнитного потока при одной и той же величине МДС обмотки, но с разными направлениями тока  $I$  в ней. Намагниченность постоянного магнита не менялась.

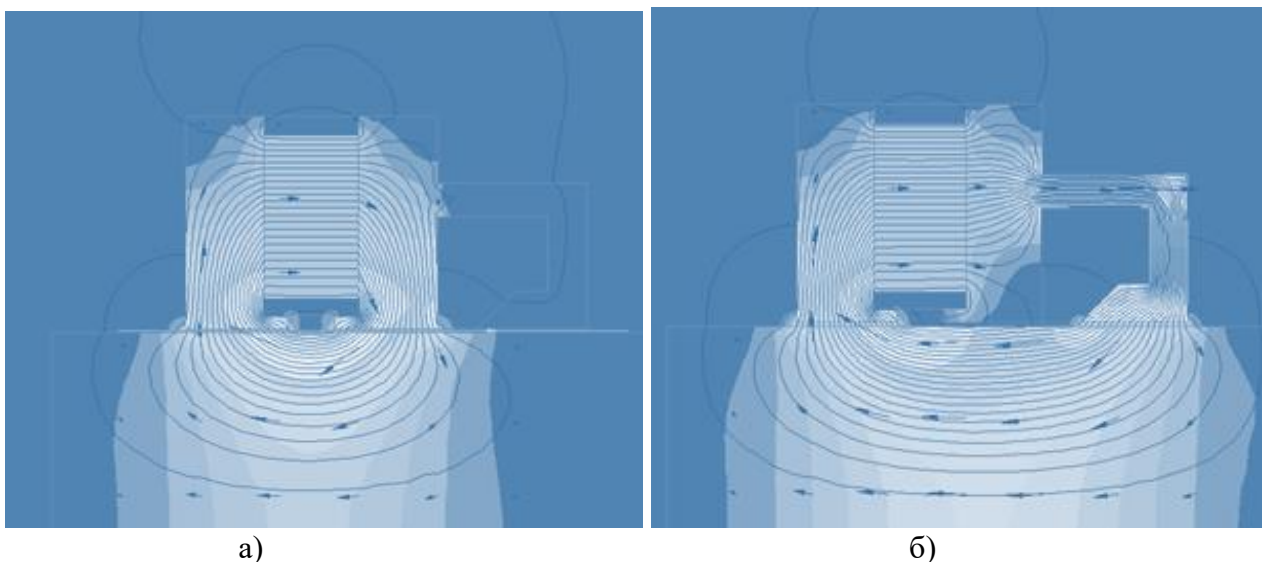


Рис. 4.14. Распределение линий магнитного потока в МЖГ при: а -  $IW=200$  А; б -  $IW=-200$  А

Из распределений линий магнитного потока при  $IW = 200$  А (рис. 4.14а) следует, что в этом случае МДС обмотки уравнивает намагничивающую силу магнита в зоне правой полюсной приставки и через нее магнитный поток



практически не проходит. Магнитный поток замыкается через левую и среднюю полюсные приставки.

При смене направления тока в обмотке и  $IW = -200$  А (рис. 4.14б) МДС обмотки уравнивает намагничивающую силу магнита в зоне средней полюсной приставки и магнитный поток практически не проходит уже через нее. Магнитный поток замыкается через левую и правую полюсные приставки.

На рисунке 4.15 представлено распределение модуля индукции магнитного поля в зазоре МЖГ при  $IW = 200$  А с разными направлениями тока. Изменение направления тока в обмотке на противоположный существенно изменяет индукцию в зазоре в зоне средней полюсной приставки - с 0,49 Тл до 0,06 Тл, т.е. в 8,17 раза. МЖ оказывается в зоне действия увеличенной магнитной индукции.

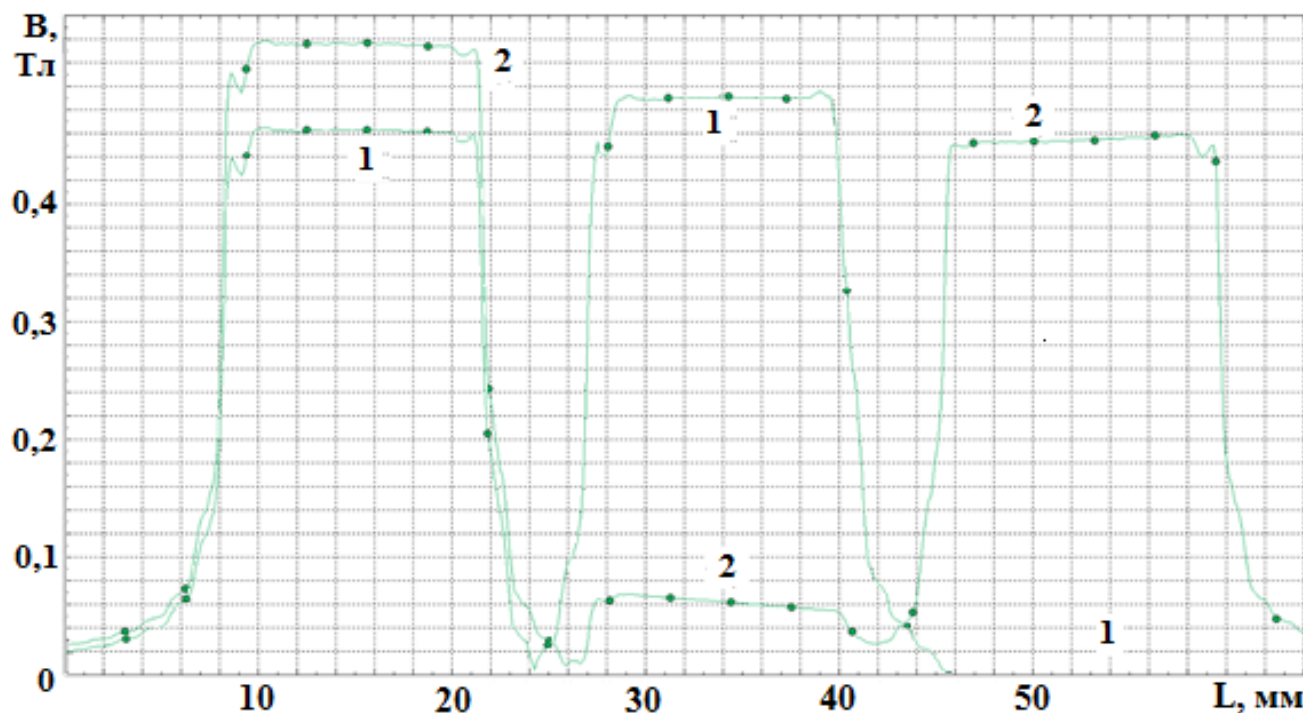


Рис. 4.15. Распределение модуля индукции магнитного поля в зазоре МЖГ:  
1 –  $IW = 200$  А; 2 –  $IW = -200$  А

Таким образом оценена степень влияния величины и направления тока в регулирующей обмотке на изменение магнитной индукции в зазоре МЖГ с наличием постоянного магнита и, опосредовано на свойства МЖГ: вязкость МЖ, критический удерживаемый перепад давлений МЖГ, момент трения, тепловое состояние МЖГ.

### 4.3. Уточненное моделирование удерживаемого перепада давлений МЖГ

МЖ имеет разные магнитные характеристики при разных концентрациях магнитных частиц (рис. 4.16). В условиях неоднородного магнитного поля в МЖ вследствие градиента магнитной индукции  $\nabla B$ , который может достигать 2000 Тл/м [64], возникает диффузия магнитных частиц, что приводит к отличию концентрации частиц в разных зонах МЖ от начальной концентрации  $C_V$  и, соответственно, разной

намагниченности МЖ в этих зонах.

Чем больше  $\nabla B$ , тем сильнее перераспределение магнитных частиц.

Экспериментальные данные [64] показывают, что перераспределение концентрации магнитных частиц между зонами МЖ и соответствующее

изменение намагниченностей зон МЖ увеличиваются с возрастанием максимальной магнитной индукции  $B_{\max}$ . Можно допустить, что концентрация магнитных частиц в зоне L МЖ перераспределяется пропорционально отношению магнитной индукции в этой зоне  $B_L$  к  $B_{\max}$ , но с учетом того, что при любом перераспределении частиц число магнитных частиц в МЖ и среднеобъемная начальная концентрация  $C_V$  должна оставаться неизменной. Поэтому концентрация частиц увеличивается в области минимального зазора под зубцом МЖГ и уменьшается в области максимального зазора в межзубцовом пространстве. Чрезмерная концентрация частиц ограничивается силами отталкивания из-за действия защитных оболочек ПАВ и расклинивающего действия основы и не может превышать плотной упаковки.

Диффузия частиц проходят в течение некоторого времени после заправки МЖ под зубец. Время перераспределения частиц при воздействии неоднородного магнитного поля зависит от  $\nabla B$ , размера частиц, вязкости МЖ, нагрева и может составлять от нескольких минут до нескольких суток [44,64].

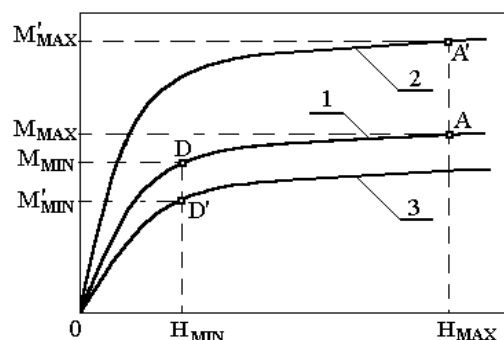


Рис. 4.16. Магнитные характеристики МЖ при разных концентрациях частиц: 1 –  $C_V$ ; 2 –  $C_2 > C_V$ ; 3 –  $C_3 < C_V$



Перераспределение концентрации магнитных частиц увеличивает критический удерживаемый перепад давлений МЖГ. Так как диффузионные процессы проходят в течение некоторого времени, то и критический удерживаемый перепад давлений в течение этого времени возрастает. При использовании линейной модели нелинейной системы критический перепад давлений может быть определен при параметрах внешнего магнитного поля с учетом перехода точки А в точку А', а точки D в D' [29,86]

$$\Delta p_{v.кр.мжг} = 0.5Z[M(B_{max} - B_{min})(M'_{max} + M'_{min}) - \rho_{мж} v_{мж}^2 \delta/D]. \quad (4.7)$$

Так же влияние перераспределения магнитных частиц на критический удерживаемый перепад давлений может быть учтено с использованием коэффициента перераспределения магнитных частиц  $K_p$  [86]

$$\Delta p_{v.кр.мжг} = Z[K_p M(B_{max} - B_{min}) - \rho_{мж} v_{мж}^2 \delta/D]. \quad (4.8)$$

$K_p$  зависит от свойств МЖ и  $B_{max}$  и был определен в [86] для разных МЖ. Для МЖ С2-40М влияние  $B_{max}$  на изменение  $K_p$  в виде аппроксимации данных представлено на рисунке 4.17. Зависимость может быть аппроксимирована в виде квадратичного полинома

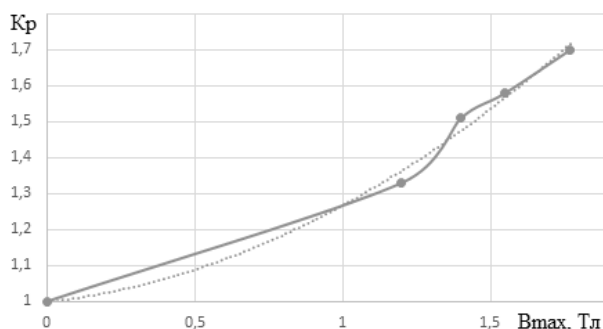


Рис. 4.17. Влияние  $B_{max}$  на изменение коэффициента перераспределения частиц

$$K_p = 0,9983 + 0,0904B_{max} + 0,1783B_{max}^2. \quad (4.9)$$

Т.е. перераспределение концентрации магнитных частиц в некоторых МЖГ может повысить критический перепад давлений до 70 %. Сама концентрация частиц в МЖ изменялась от 14 до 22,5 %.  $B_{max}$  при учете эффекта перераспределения частиц становится немного больше,  $B_{min}$  - немного меньше индукций, определенных без учета перераспределения магнитных частиц. При вращении МЖ и нагреве перераспределение частиц снижается перемешиванием слоев МЖ и вследствие возрастания тепловой диффузии. При использовании правильно выбранного коэффициента  $K_p$  погрешность расчета критического перепада давлений снижается в 2-3 раза [64].

В статическом режиме МЖГ под действие магнитного поля в МЖ из магнитных частиц формируется структура, для разрушения которой необходимо приложить дополнительный перепад давлений  $\Delta p_{\text{структ}}$ , зависящий от прочности структуры. При начале вращения вала  $\Delta p_{\text{структ.}v}$  начинает уменьшаться из-за нарушения структуры частиц. Для  $B_{\text{ср}} = 0.6-0.7$  Тл структура частиц разрушается при окружной скорости МЖ  $v_{\text{разр}} \sim 0.1$  м/с (при  $R=0.015$  м  $n_{\text{разр}} = 64$  об/мин) [44]. При повышении магнитной индукции в МЖ структурное взаимодействие частиц возрастает и разрушение структуры частиц происходит при большей  $v_{\text{разр}}$ . В предположении экспоненциального

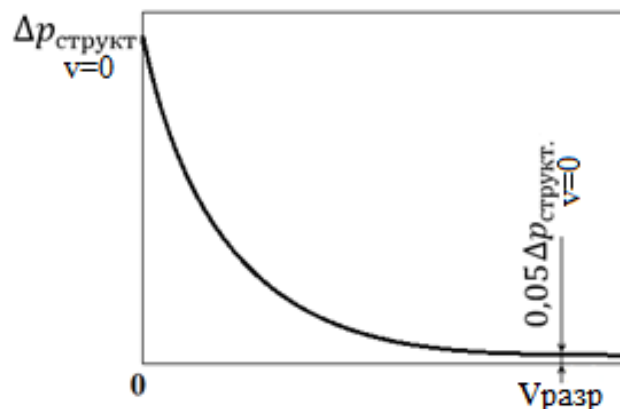


Рис. 4.18. Структурный перепад давлений

закон процесса разрушения структуры частиц с изменением  $v$ , с погрешностью полного разрушения до 5 % при  $v_{\text{разр}}$  (рис. 4.18),

$$\Delta p_{\text{структ.}v} = \Delta p_{\text{структ.}v=0} e^{-3v_{\text{мж}}/v_{\text{разр}}} . \quad (4.10)$$

Для магнетитовой МЖ  $\Delta p_{\text{структ.}v=0} \leq 0.25 \Delta p_{\text{ст.кр.мжг}}$  [44].

Критический удерживаемый перепад давлений МЖГ при  $v_{\text{мж}}$

$$\Delta p_{v.\text{кр.мжг}} = Z \{ K_p M (B_{\text{max}} - B_{\text{min}}) (1 + 0.25 e^{-3v_{\text{мж}}/v_{\text{разр}}}) - \rho_{\text{мж}} v_{\text{мж}}^2 \delta / D \}. \quad (4.11)$$

Для МЖГ АД ВРАБ225 примем:  $Z=6$ ,  $D=0.065$  м,  $B_{\text{max}}=1.77$  Тл и  $B_{\text{min}}=0.4$  Тл, обеспеченными комбинированным возбуждением,  $\delta=0.00025$  м;

для МЖ:  $M = 40$  кА/м,  $\rho_{\text{мж}}=1100$  кг/м<sup>3</sup>,  $K_p = 1.7$ ,  $n_{\text{разр}} = 30$  об/мин

Соотношение для  $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}}$  принимает вид

$$\Delta p_{v.\text{кр.мжг}} = 6 \left\{ \frac{1,7 \cdot 40000 \cdot (1,77 - 0,4) \left( 1 + 0,25 e^{-\frac{3n}{30}} \right) - 9,81 \cdot 1100 (\pi 0,065 / 60)^2 n^2 0,00025 / 0,065}{\phantom{1,7 \cdot 40000 \cdot (1,77 - 0,4) \left( 1 + 0,25 e^{-\frac{3n}{30}} \right) - 9,81 \cdot 1100 (\pi 0,065 / 60)^2 n^2 0,00025 / 0,065}} \right\} =$$

$$= 558960 + 139740 e^{-3n/30} - 0.002806 n^2 \text{ Па.}$$

$$\text{Или } \Delta p_{v.\text{кр.мжг}} = 5.5896 + 1.3974 e^{-3n/30} - 0.002806 \cdot 10^{-5} n^2 \text{ ати.} \quad (4.12)$$

На рисунке 4.19 представлено рассчитанное по приведенным соотношениям изменение критического удерживаемого перепада давлений

МЖГ с изменением частоты вращения вала АД. Структурная составляющая перепада давлений проявляется только на самом начале характеристики.

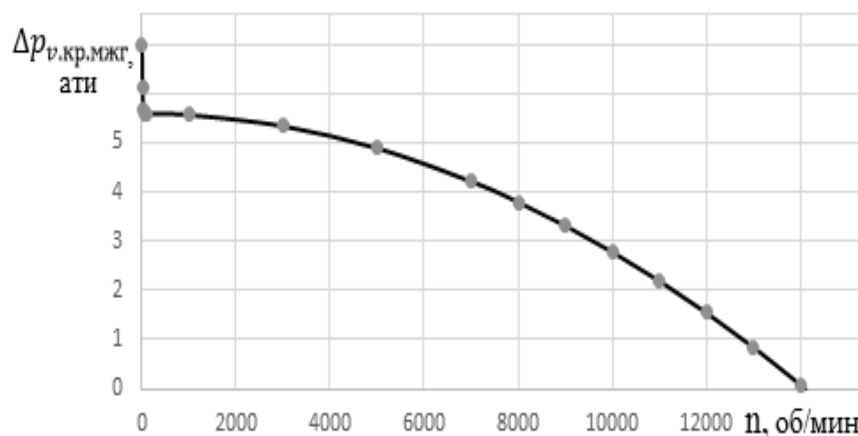


Рис. 4.19. Изменение критического удерживаемого перепада давления МЖГ с изменением частоты вращения вала АД

Нулевой перепад

давлений возникает при  $n_{\text{пред}} = 14110$  об/мин, что соответствует линейной скорости  $v_{\text{пред}} = 47.95$  м/с.

Магнитный поток торцевого рассеяния в режиме ХХ электродвигателя Фб усиливает  $B_{\text{max}}$  под одной полюсной приставкой и ослабляет под другой до 14 % (см. раздел 4.1), что приводит к размагничиванию МЖГ и снижению перепада давлений до 4,0 %. Так как критический удерживаемый МЖГ перепад давлений определяется магнитной индукцией, то одна полюсная приставка будет удерживать несколько больший перепад давлений, другая – меньший. С ростом нагрузки электродвигателя влияние электромагнитных процессов в ЭД на перепад давлений ослабевает. Шунтирование зазора шарикоподшипником снижает  $B_{\text{max}}$  и удерживаемый перепад давлений до 4,3 %. Вследствие нелинейной зависимости диффузии магнитных частиц, намагниченности зон МЖ, разности ( $B_{\text{max}} - B_{\text{min}}$ ) от индукции под разными полюсами это приводит к снижению  $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}}$ ,  $n_{\text{пред}}$  и  $v_{\text{пред}}$  до 4.5 %. Управление регулирующей обмотки способно компенсировать снижение магнитного потока в МЖГ (см. раздел 4.2).

Таким образом, выполнен уточненный расчет и анализ удерживаемого перепада давлений МЖГ с учетом структурной составляющей перепада давлений, перераспределения концентрации магнитных частиц по зонам и изменения локальных намагниченностей МЖ, влияния электромагнитных процессов в ЭД и регулирующей обмотки.

#### 4.4. Определение формы поверхности и распределения поля скоростей течения МЖ в зазоре магнитожидкостного герметизатора

**Определение формы поверхности и положения магнитной жидкости в зазоре МЖГ.** При увеличении внешнего воздействующего перепада давлений  $\Delta p_{\text{внеш}}$  МЖ постепенно выдавливается из зазора. МЖ принимает такую форму, которая соответствует минимуму ее потенциальной энергии, при предельном  $\Delta p_{\text{внеш}}$  МЖ занимает критическое положение. При дальнейшем увеличении  $\Delta p_{\text{внеш}}$  целостность магнитожидкостной пробки нарушается, наступает пробой МЖГ и потеря свойства герметизации. Форма и положение МЖ в зазоре влияют на показатели МЖГ – распределение магнитного поля в МЖГ, удерживаемый перепад давлений  $\Delta p_{\text{МЖГ}}$ , момент трения  $M_{\text{тр}}$ , температуру МЖ  $T_{\text{МЖ}}$ . Пренебрежение занимаемым положением и формой МЖ может приводить к погрешностям определения свойств МЖГ до 10 % [26].

Удерживаемый МЖГ  $\Delta p_{\text{МЖГ}}$  определяется распределением магнитного поля в МЖ (см., например, рис. 4.4б), значениями максимальной и минимальной индукций. Удержание  $\Delta p_{\text{внеш}}$  в МЖГ может быть обеспечено при разности индукций по границах МЖ

$$B_{\text{max}} - B_{\text{min}} = \frac{1}{M} (\Delta p_{\text{внеш}}/Z + \rho_{\text{МЖ}} v_{\text{МЖ}}^2 \delta/D) . \quad (4.13)$$

Форма МЖ будет принимать такую конфигурацию, при которой обеспечивается требуемая разность магнитных индукций. Для расчета магнитного поля, значений  $B_{\text{min}}$  и  $B_{\text{max}}$  нужно предварительно задать положение МЖ. Если в результате расчета разность  $(B_{\text{max}} - B_{\text{min}})$  на границах МЖ не будет соответствовать  $\Delta p_{\text{внеш}}$ , то требуется изменить конфигурацию МЖ, что перераспределит магнитные сопротивления в структуре МЖГ и потребует нового расчета магнитного поля. Таким образом, не зная положение МЖ, невозможно точно рассчитать магнитное поле, а, не зная распределение магнитного поля, невозможно определить положение и форму МЖ, удерживаемый МЖГ перепад давлений  $\Delta p_{\text{МЖГ}}$ .

$\Delta p_{\text{внеш}}$ , выдавливая МЖ в сторону области с меньшим давлением, изменяет границы МЖ и индукцию на них. МЖ примет такую форму и положение, при

которой, если это возможно, произойдет уравнивание усилий от  $\Delta p_{\text{внеш}}$  силами магнитного тяжения в МЖ. МЖ будет деформирована таким образом, чтобы разность давлений между двумя любыми точками двух поверхностей, обращенных к областям с разными давлениями, в соответствии с законом Паскаля, была одинакова. Поэтому индукция во всех точках поверхности МЖ, обращенной к области с большим давлением, будет  $B_{\text{max}}$  и одинаковой. Также во всех точках на поверхности МЖ, обращенной к области с меньшим давлением, индукция будет меньшая -  $B_{\text{min}}$ , но одинаковой. Поэтому  $\Delta p_{\text{МЖГ}}$  может быть определен по значениям индукций в двух любых точках на разных границах МЖ.

Определение конфигурации МЖ может выполняться итерационно путем последовательных расчетов магнитного поля с неким алгоритмом изменения границ МЖ, как, например, в [32]. Процесс подбора границ повторяется до тех пор, пока наблюдается расхождение между воздействующим  $\Delta p_{\text{внеш}}$  и обеспечиваемым МЖГ  $\Delta p_{\text{МЖГ}}$ . В таком оптимизационном процессе поиска формы МЖ [24] в качестве параметров поиска выступают координаты точек границ МЖ, а в качестве минимизируемой функции модуль разности  $|\Delta p_{\text{внеш}} - \Delta p_{\text{МЖГ}}|$ . Оптимизационный процесс продолжается до тех пор, пока не будут найдены положения всех точек обеих границ МЖ, в которых обеспечиваются заданные  $B_{\text{min}}$  и  $B_{\text{max}}$ .

Постановка задачи в таком виде достаточно трудна. В практических задачах наиболее важно определять критическое положение МЖ. Существуют приближенные алгоритмы определения положения и формы МЖ. В модели МЖГ задается направление действия перепада давлений, например, слева от оси зубца полюса направо. При заданном  $B_{\text{min}} = (0,1-0,3) \text{ Тл}$  по (4.13) находится  $B_{\text{max}}$ . По результатам расчета магнитного поля определяется линия, соединяющая точки в зазоре МЖГ с равными значениями  $B_{\text{max}}$ , расположенные слева от оси зубца. Обычно эта линия – граница МЖ, проходит от поверхности полюса к валу. При чрезмерном  $\Delta p_{\text{внеш}}$  и  $B_{\text{max}}$  линия может не замыкаться на вал. Это означает за критическое положение МЖ и такой  $\Delta p_{\text{внеш}}$  МЖГ выдержать не может.

Далее рассматриваются элементы конечно-элементной модели в зазоре, расположенные справа от границы с  $B_{\text{max}}$  и элементы, в которых индукция  $B$

попадает в диапазон  $B_{\max} \div B_{\min}$ , считаются элементами МЖ. На первой итерации границы положения МЖ могут быть изломанными. Для уточненного определения границ МЖ на последующих итерациях целесообразно их выглаживание с последующей перетриангуляцией области. Далее производится перерасчет магнитного поля, процедура определения границ МЖ повторяется. На рисунке 4.20 приведен фрагмент уточненной конечно-элементной модели МЖГ с рассчитанным в системе EMlib [71] положением МЖ.

Определение положения магнитной жидкости в зазоре МЖГ, изменения ее границ и формы вследствие действия внешнего перепада давлений с учетом центробежных сил возможно в системе COMSOL при задании граничного условия «Fluid-Fluid Interface» [80,43]. Реализуется, как например, в [43], перемещение границы раздела сред МЖ-воздух по поверхностям зубца и вала с переформированием расчётной модели.

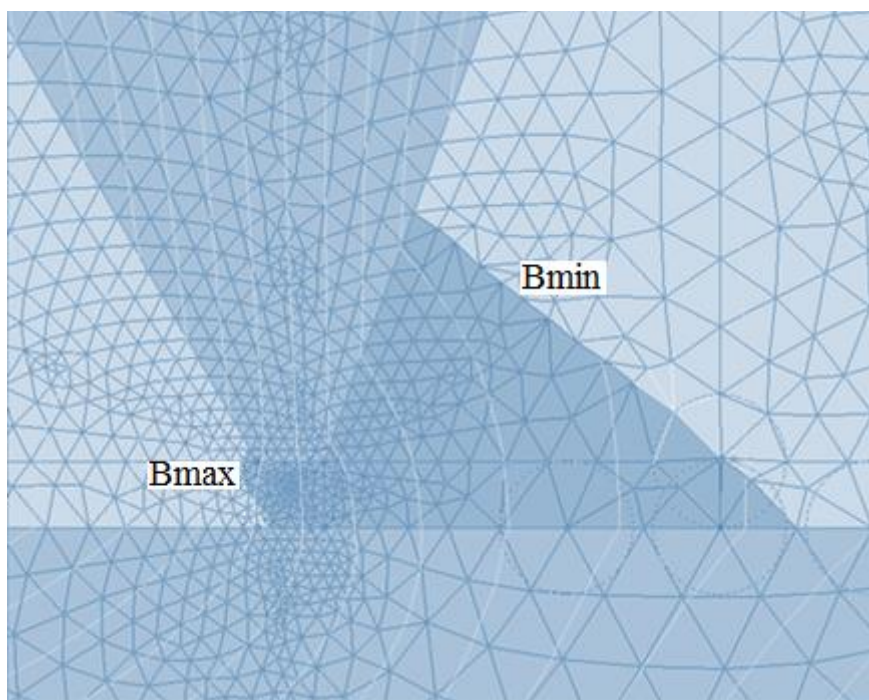


Рис. 4.20. Фрагмент уточненной конечно-элементной модели с рассчитанным критическим положением МЖ системе EMlib

Положение МЖ в зазоре МЖГ необходимо для определения свойств МЖГ, оно определяет площадь контакта МЖ с валом  $S$ , что влияет на  $M_{тр}$ .

**Определение распределения поля скоростей течения магнитной жидкости в зазоре МЖГ.** При работе МЖГ в МЖ возникает тангенциальное относительно вала течение. Характеристика этого течения определяет момент трения  $M_{тр}$  МЖГ и мощность потерь  $\Delta P_{мж}$  в МЖ. При нелинейной магнитореологической зависимости динамической вязкости  $\eta$  МЖ от магнитной индукции  $B$  и ско-

рости сдвига  $\gamma$ , определяемой частотой вращения вала  $n$ , профиль скорости течения МЖ имеет нелинейный характер. На распределение поля скоростей течения МЖ влияет неравномерность зазора с наличием зубцов полюсных наконечников, неоднородность магнитного поля в зазоре.

В предположении стационарного ламинарного течения МЖ, с концентрическими вокруг вала слоями (струями) течения, гидродинамический расчёт описывается уравнением Навье-Стокса, решаемым для поля скоростей  $v$  и давления  $p$ . Уточненное моделирование распределения поля скоростей течения МЖ в зазоре МЖГ возможно на основе частной двухмерной полевой плоскомеридианной модели области МЖ, содержащей множество конечных элементов [31,70]. Расчет проводится в осях  $r$  и  $z$ . Расчет целесообразно, для удобства реализации, проводить относительно радиальной функции скорости  $\varphi = r \cdot v_\theta = r^2 \cdot \omega$ , где  $v_\theta$  – тангенциальная (по угловой координате  $\theta$ ) скорость течения МЖ,  $\omega$  – угловая скорость. Дифференциальное уравнение течения вязкой МЖ имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\eta}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\eta}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial (r\theta)}. \quad (4.14)$$

Здесь  $\eta$  – динамическая вязкость МЖ, определяемая из нелинейной магнитореологической характеристики при скорости сдвига  $\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$ ;  $\frac{\partial p}{\partial (r\theta)}$  – тангенциальная составляющая градиента внутреннего давления в МЖ.

Без источника тангенциального напора в МЖ можно принять, что внутреннее давление  $p$  в тангенциальном направлении не изменяется, т.е.  $\frac{\partial p}{\partial (r\theta)} = 0$ . В этом случае выше приведенное уравнение соответствует уравнению Лапласа с нелинейными коэффициентами

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\eta}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\eta}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0. \quad (4.15)$$

Вначале выполняется определение критического положения магнитожидкостной пробки при максимально возможном удерживаемом перепаде давлений. Эта область положения МЖ вычленялась и для нее рассчитывалось поле скоростей течения МЖ в плоскомеридианном сечении зазора МЖГ. На рисунке 4.21

представлена расчетная область для расчета поля скоростей течения МЖ.

В качестве граничных условий на поверхности зубца полюса задавалась нулевая скорость течения МЖ, на поверхности вала для скорости течения МЖ задавалась окружная скорость вращения вала, на свободных границах раздела сред МЖ-воздух задавалась нулевая нормальная производная скорости течения МЖ.

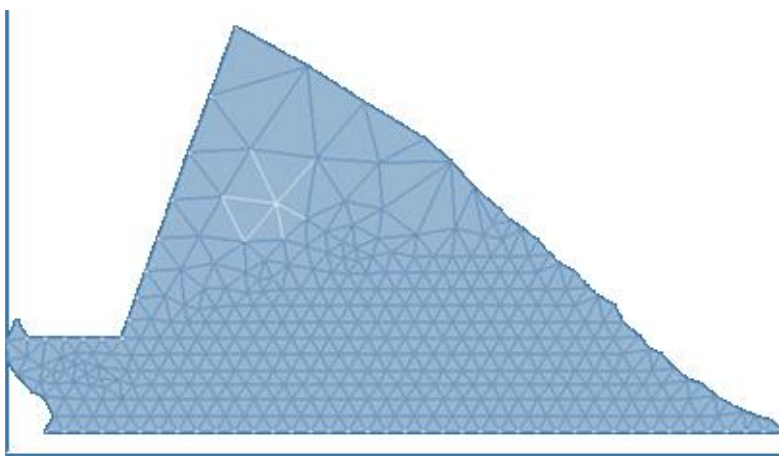
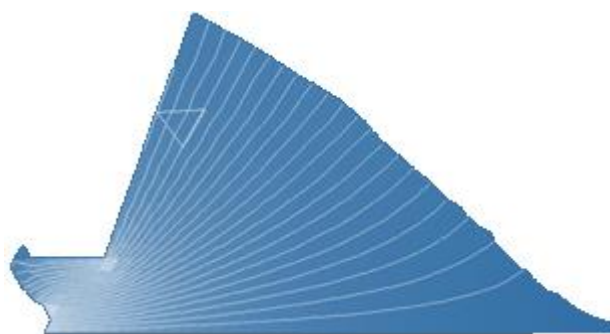


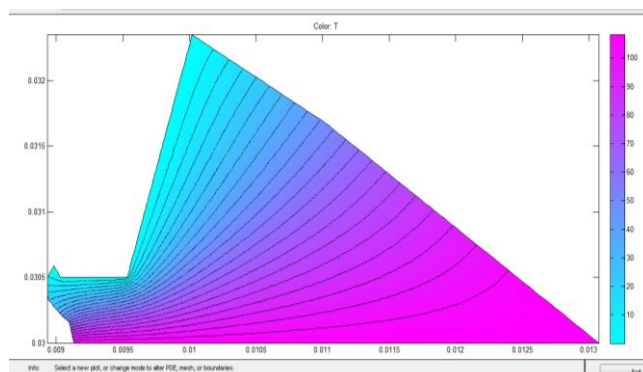
Рис. 4.21. Область расчета поля скоростей течения МЖ при ее критическом положении

Расчет поля распределения скоростей течения

МЖ осуществляется в системе EMLib. В итоге решения в каждом элементе модели МЖ определялась своя скорость течения и своя динамическая вязкость, определенная магнитореологической характеристикой при заданной индукции в элементе. На рисунке 4.22а представлено распределение линий равных скоростей течения МЖ средствами библиотеки EMLib [71]. Аналогичный расчет данной модели может осуществляться в других системах, например, в системе расчета магнитного поля. Однако вместо величины  $\Psi = rA$  здесь в качестве расчетной величины подразумевается величина  $\varphi = rv$ . Кроме того, вместо кривой намагничивания  $B = f(H)$  используется магнитореологическая характеристика  $\eta = f(\gamma, B)$ . В более ограниченном варианте можно использовать систему ElCut, но



а)



б)

Рис. 4.22. Распределение линий равных скоростей течения МЖ в зазоре МЖГ: а – рассчитанное в системе EMLib; б - рассчитанное в системе MatLab



при задании характеристики МЖ только в функции одной переменной, например,  $\eta = f(\gamma)$ . Такую же задачу распределения поля скоростей течения МЖ с решением уравнения Лапласа можно рассматривать в среде MatLab [75] с использованием библиотеки PDETool - решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов (рис. 4.22б).

Анализ распределения скоростей течения слоев МЖ необходим для корректного расчета  $M_{тр}$  и нагрева МЖГ. Выявлено, что разброс скоростей сдвига  $\gamma$  МЖ может достигать 5 раз - от  $\gamma_{max}$  в минимальном зазоре под зубцом до  $\gamma_{min}$  в межполюсном пространстве, разброс динамической вязкости  $\eta$  МЖ может достигать 3 раз. Возрастание  $\gamma$  в минимальном зазоре под зубцом, приводящее к снижению  $\eta$ , сопровождается повышением в этой зоне магнитной индукции  $B$ , что в свою очередь увеличивает  $\eta$ . Значительный разброс  $\gamma$  и  $B$  по объему МЖ, обуславливает целесообразность многоэлементного представления МЖГ при моделировании магнитогидродинамического состояния МЖ с учетом нелинейности ее магнитореологической характеристики.

Таким образом, представленный подход обеспечивает нахождение формы и критического положения магнитной жидкости, площади контакта МЖ с валом, определение поля скоростей течения магнитной жидкости в зазоре.

#### **4.5. Расчет мощности потерь, момента трения и теплового состояния МЖГ**

**Уточненное определение мощности потерь в МЖГ.** Мощность потерь в МЖ  $\Delta P_{мж}$ , выделяемых на вязкое трение перемещающихся в тангенциальном направлении слоев МЖ, определяется динамической вязкостью МЖ  $\eta$ , скоростью сдвига слоев  $\gamma$  и объемом движущейся МЖ  $V_{мж}$

$$\Delta P_{мж} = 0,5\eta\gamma^2V_{мж} . \quad (4.16)$$

Скорость сдвига слоев МЖ определяется  $n$  и распределением поля скоростей течения, поэтому мощность потерь квадратично возрастает с увеличением частоты вращения вала  $n$ . МЖ имеет нелинейную магнитореологическую характеристику. Повышение концентрации частиц и магнитной индукции увеличивают вязкость МЖ, повышение скорости сдвига снижает вязкость МЖ.

Существенное различие скоростей сдвига слоев МЖ (до 5 раз), магнитных индукций ( $B_{\max}/B_{\min} \sim 3-5$ ), концентраций магнитных частиц (до 2 раз), вязкости МЖ (до 3 раз) в разных зонах МЖ вызывает существенное различие выделяемых удельных потерь в этих зонах. Поэтому корректное определение потерь на вязкое трение в МЖ нужно проводить по множеству зон МЖ.

При разделении объема МЖ на  $N$  элементов (струй) с объемами  $V_L = 2\pi r_L S_L$ , где  $S_L$  поперечная площадь струи,  $r_L$  - радиус центра струи от вала, мощность потерь

$$\Delta P_{\text{МЖ}} = \sum_{L=1}^N \eta_L \gamma_L^2 V_L . \quad (4.17)$$

Наибольшая удельная мощность потерь возникает в узкой части зазора, где наибольшая скорость сдвига МЖ. Увеличение токов в электротехнической системе в регулирующей “обмотке (р)” и/или “обмотке (н)” и/или МДС магнита вызывает в первом приближении пропорциональное возрастание магнитной индукции и, как следствие, вязкости и мощности потерь в степени 0,5.

**Расчет момента трения МЖГ.** Момент трения МЖГ зависит от окружной скорости  $v_{\text{МЖ}}$ . Его можно представить в виде суммы двух составляющих

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{структ.}v} + M_{\text{тр.}v} , \quad (4.18)$$

где  $M_{\text{структ.}v}$  – структурная составляющая  $M_{\text{тр}}$ , обусловленная сформировавшейся структурой магнитных частиц МЖ.

При начале вращения вала  $M_{\text{структ.}v}$  уменьшается из-за начала нарушения структуры частиц в МЖ и при  $v_{\text{МЖ}} \sim (0.1-0.3)$  м/с [44] структура частиц разрушается полностью. В предположении экспоненциального разрушения структуры частиц с изменением  $v$ , с допущением погрешности полного разрушения структуры в 5 % при  $v_{\text{разр}}$  (см. рис. 4.18),

$$M_{\text{структ.}v} = M_{\text{стр}} e^{-3v/v_{\text{разр}}} , \quad (4.19)$$

где  $M_{\text{стр}} = \beta R Z S \tau_{0,B>0}$  - момент страгивания при  $v = 0$ .

Составляющая  $M_{\text{тр}}$ , обусловленная вязким трением слоев МЖ

$$M_{\text{тр.}v} = \eta Z R S v / \delta = 2\pi \eta Z R^2 S n / (60\delta),$$

где  $S$  - площадь контакта МЖ с валом, зависит положения МЖ пробки.

Для полюсных приставок с прямоугольными зубцами шириной  $b$

$$M_{тр} = 4\pi^2 Z \eta n R^3 b / (60\delta) .$$

Таким образом  $M_{тр} = 4\pi^2 Z \eta n R^3 b / (60\delta) + 2\pi\beta R^2 Z b \tau_{0,B>0} e^{-3n/n_{разр}} . (4.20)$

Изменение  $M_{тр}$  с изменением  $v$  показывает, что (рис. 4.23) для МЖГ с псевдопластичной МЖ при большом  $\tau_0$  имеется минимум  $M_{тр}$  при частоте вращения  $v < v_{разр}$ . При  $v_{мж} > 20$  м/с начинается переход от ламинарного течения МЖ к течению с образованием вихрей, резкому повышению  $M_{тр}$  и вязкостных потерь.

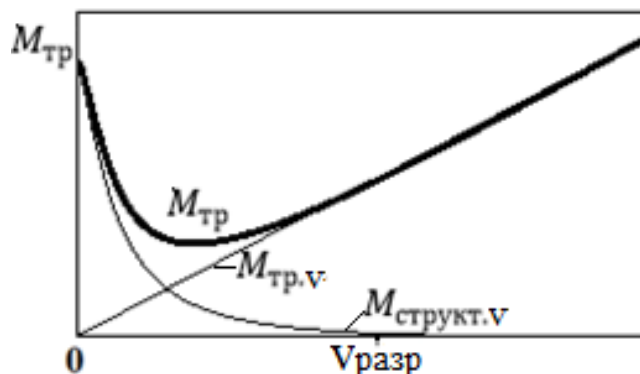


Рис. 4.23. Изменение момента трения с ростом  $v$

Для МЖГ АД ВРАБ225 с данными:

$$D=0.065 \text{ м, } v_{max}=1.77 \text{ Гл, } b=0.002 \text{ м, } Z=6, \delta=0.00025 \text{ м, } \gamma = \frac{2\pi R n}{60\delta} = 13.6n;$$

для МЖ с данными:  $\tau_{0,B=0} = 50.0$  Па,  $\beta = 5$ ,  $n_{разр} = 30$  об/мин,  $\eta_{\gamma=1000} = 0.2$  Па·с;

$$\tau_{0,B>0} = \tau_{0,B=0} (1 + 2.65\sqrt{B}) = 50(1 + 2.65\sqrt{1.77}) = 226.3 \text{ Па;}$$

при  $\gamma < 1000 \text{ с}^{-1}$   $\eta_{\gamma} = 31,62\eta_{\gamma=1000}/\sqrt{\gamma}$ .

Для МЖГ АД ВРАБ225 при  $\gamma = \pi D n / (60\delta) = 1000 \text{ с}^{-1} - n = 73,5$  об/мин.

Тогда

$$\eta(\gamma, B) = \frac{31,62\eta_{\gamma=1000}(1+2,65\sqrt{B})}{\sqrt{\gamma}} = 31,62 \cdot 0.2(1 + 2,65\sqrt{1.77})/\sqrt{13.6n} = 7,76/n^{0.5} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Соотношение для  $M_{тр}$  принимает вид

$$M_{тр} = 4\pi^2 6 \cdot 7.76 \cdot \frac{0.0325^3 0.002 n^{0.5}}{60 \cdot 0.00025} + 2\pi \cdot 5 \cdot 0.0325^2 \cdot 0.002 \cdot 6 \cdot 226.3 e^{-3n/30} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$\text{Или } M_{тр} = 0.0084n^{0.5} + 0.089e^{-3n/30} \text{ Н}\cdot\text{м} . (4.21)$$

На рисунке 4.24 представлено изменение  $M_{тр}$  МЖГ с изменением частоты вращения вала АД. Структурная составляющая  $M_{тр}$  проявляется только в начале характеристики. Так же, как и для ДРМЖ, увеличение в электротехнической системе МДС регулирующих обмоток вызывает в первом приближении возрастание вязкости и, соответственно,  $M_{тр}$  в степени 0,5.

Магнитный поток торцевого рассеяния в режиме электродвигателя Фб усиливает  $B_{\text{max}}$  под одной полюсной приставкой и ослабляет под другой (см. раздел 4.1), что приводит к размагничиванию МЖГ и снижению  $M_{\text{тр}}$  (3-4) %.

С ростом нагрузки электродвигателя влияние электромагнитных процессов в ЭД на  $M_{\text{тр}}$  МЖГ ослабевает. Шунтирование зазора шарикоподшипником снижает  $B$  и  $M_{\text{тр}}$  до 3 %. Управление регулирующей обмотки изменяет  $B$  и  $M_{\text{тр}}$ .

Мощность потерь в МЖ  $\Delta P_{\text{мж}}$  [17] покрывается механической мощностью со стороны вращающегося вала и электромагнитной мощностью вращающегося магнитного поля двигателя. Для МЖГ собственный момент трения  $M_{\text{тр}}$  можно определить энергетическим методом по рассчитанным мощностям потерь во множестве струй МЖ

$$M_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{мж}} / \omega . \quad (4.22)$$

Результаты экспериментальных исследований [44,64] показывают, что в течение 4 месяцев после заправки МЖ в находящемся в покое или работающем при постоянной частоте вращения вала может наблюдаться значительное, до 1,5-2,0 раз, возрастание вследствие перераспределения магнитных частиц  $M_{\text{тр}}$  МЖГ, далее наступает некоторая стабилизация.

Таким образом, выполнено моделирование удерживаемого  $M_{\text{тр}}$  МЖГ с учетом структурной составляющей, нелинейных характеристик МЖ, зависящих от  $B$  и  $\gamma$ , влияния электромагнитных процессов в ЭД и регулирующей обмотки.

**Определение теплового состояния МЖГ.** Потребленная при работе МЖГ энергия на вязкое трение слоев МЖ  $t \Delta P_{\text{мж}}$  преобразуется в тепловую энергию  $Q$ , т.е  $Q = \Delta P_{\text{мж}} t$ . Происходит нагрев МЖГ и из-за невысокой теплопроводности МЖ  $\lambda_{\text{мж}} = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  могут возникать зоны с предельной температурой.

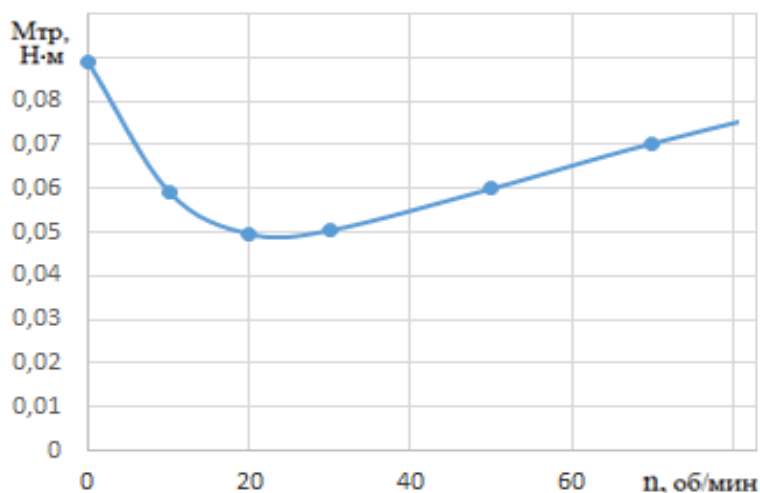


Рис. 4.24. Изменение  $M_{\text{тр}}$  МЖГ в зоне небольших частот вращения вала АД

Теплофизические свойства МЖГ зависят от магнитного состояния. С увеличением  $B$   $\lambda_{\text{мж}}$  в направлении магнитного потока возрастает до 15 %. Рост температуры снижает ориентированность магнитных моментов частиц по внешнему полю, что уменьшает намагниченность МЖ. Так температурное изменение намагниченности МЖ происходит с интенсивностью  $\beta_M \sim 0.15 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Вследствие термозависимости магнитных свойств магнита и МЖ  $B_{\text{max}}$  при нагреве может снижаться до 15 %,  $B_{\text{min}}$  - до 30 %. Критический удерживаемый перепад давлений нелинейно снижается с ростом температуры, так как одновременно снижаются магнитные свойства магнита и намагниченность МЖ. Повышение температуры на несколько десятков градусов приводит к снижению критического удерживаемого перепада давлений до 20-40 % [33,79,85]. Повышение температуры МЖ увеличивает тепловую энергию частиц и их тепловую диффузию, что сглаживает эффект магнитной диффузии. Это подчеркивает важность корректного анализа теплового состояния МЖГ.

Дифференциальное уравнение нагрева МЖГ, отражающее баланс энергии, выделяемой в МЖ и отводимой теплоотдачей с поверхности  $S$ , за время  $dt$

$$Qdt = C_Q m dT + \alpha S \Delta T dt, \quad (4.23)$$

где  $Q$  – мощность тепловыделений;  $C_Q$  – удельная теплоемкость;  $m$  – масса;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S$ ;  $\Delta T = T_t - T_0$  – достигаемый перегрев - превышение температуры  $T_t$  над температурой начала процесса  $T_0$  за время  $t$ .

В установившемся режиме, все выделяемая теплота рассеивается в окружающую среду, т.е.

$$Q = \alpha S (T_{\text{мж,уст}} - T_0).$$

Тогда установившаяся температура  $T_{\text{мж,уст}} = T_0 + Q/\alpha S$ .

Дифференциальное уравнение при отводе энергии теплопроводностью

$$\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) - C_Q m \frac{dT}{dt} + Q = 0, \quad (4.24)$$

где  $\text{grad} T$  – градиент температуры;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

В стационарном режиме  $\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) = -Q$ . (4.25)

Теплообмен на поверхности МЖ  $S$ , охлаждаемой конвекцией газообразной среды, связывает плотность теплового потока  $q$  пересекающей поверхность

с температурами поверхности  $T_S$  и охлаждающей среды  $T_{\text{внеш}}$

$$q = \frac{Q}{S} = \alpha(T_S - T_{\text{внеш}}) . \quad (4.26)$$

На поверхности раздела “МЖ-охлаждающая среда” должно выполняться равенство тепловых потоков, т.е.

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T_S - T_{\text{внеш}}) , \quad (4.27)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности  $S$ .

Анализ теплового состояния МЖГ проводился на 3D моделях в комплексе Ansys [11,16,14]. Твёрдотельное моделирование МЖГ выполнялось средах Solidworks и AutoCad (рис. 4.25) с импортированием CAD модели в систему Ansys.

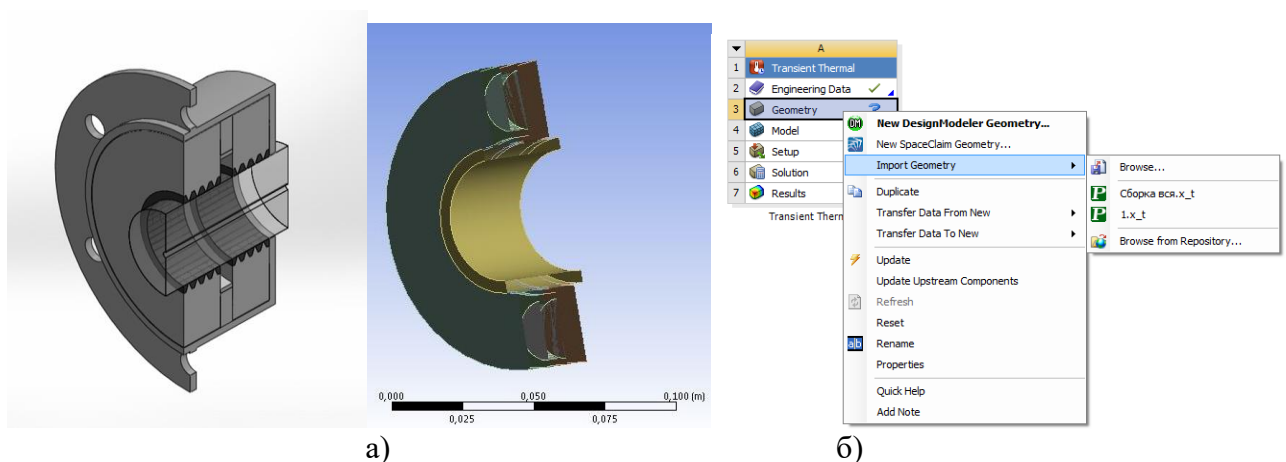


Рис. 4.25. Конструкция МЖГ (а), модель (б), импортирование модели в систему расчета (в)

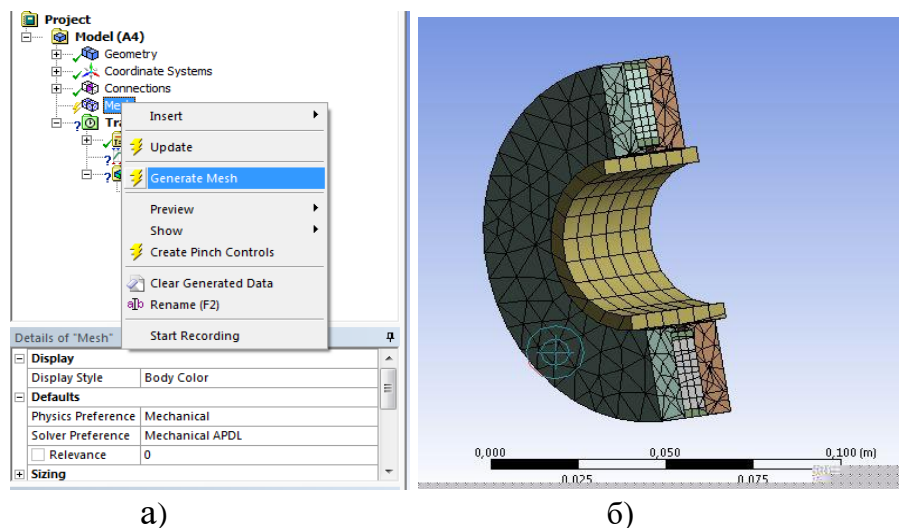


Рис. 4.26. Генерирование (а) и трехмерная конечно-элементная модель МЖГ (б)

Генерирование 3D конечно-элементной модели представлено на рисунке 4.26. При решении задачи по нахождению распределения температуры принимались условия: начальная температура МЖГ  $T_0 = 22$  °С;  $T_{\text{внеш}} = 20$  °С; время процесса нагрева  $t = 30$  мин. Полное время расчета, при шаге расчета по времени

180 с, составило 1800 с (рис. 4.27). Трехмерное распределение перегрева температур -  $\Delta T = T_t - T_0$  в МЖГ представлено на рисунке 4.28.

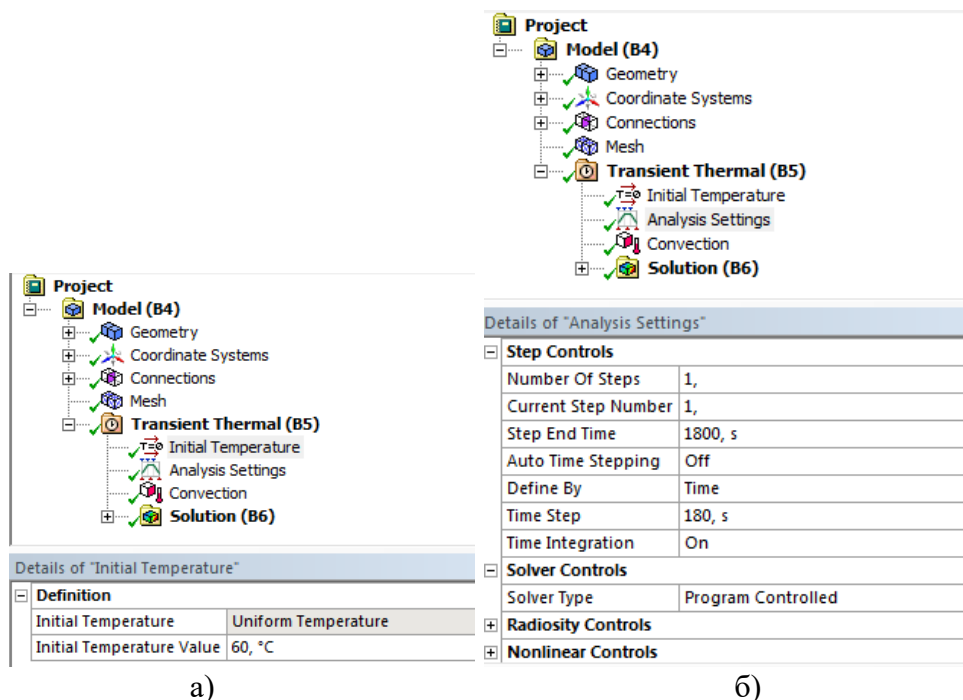


Рис. 4.27. Задание условий: а – предельной температуры; б – параметров расчета

Трехмерное моделирование требует значительных вычислительных ресурсов и занимает продолжительное время. В связи с осевой симметрией МЖГ возможно рассматривать двухмерные относительно оси вала задачи. Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности плоскомеридианной задачи в осях  $(r,z)$  для радиальной функции температуры  $\varphi = r \cdot T$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\lambda}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\lambda}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) - C_Q \frac{\partial T}{\partial t} = -Q. \quad (4.28)$$

Для взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 выполнено моделирование осесимметричного теплового поля МЖГ с  $D = 65$  мм,  $\delta_{\min} = 0,25$  мм.

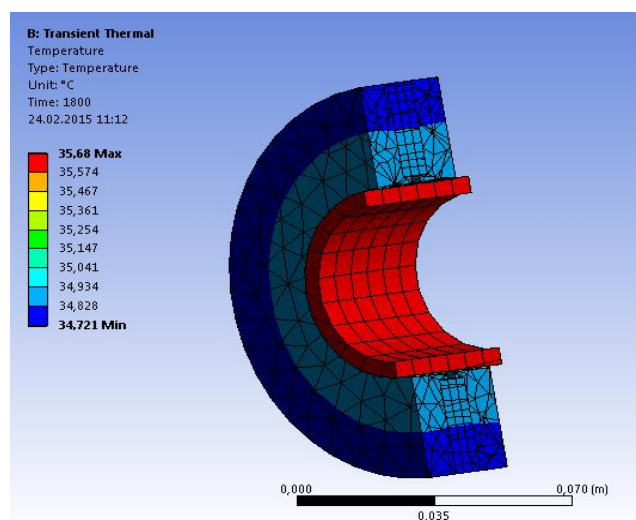


Рис. 4.28. Трехмерное распределение температуры в МЖГ



Твердотельное моделирование выполнено в Компас-3D (рис. 4.4а) с импортированием CAD модели в систему ELCUT и формированием расчетной модели с граничными условиями (рис. 4.29).

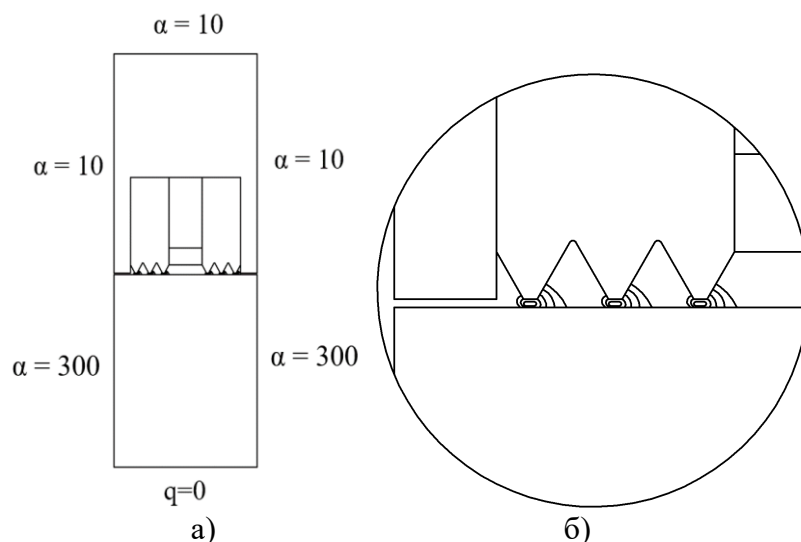


Рис. 4.29. Расчетная область МЖГ взрывозащищенного двигателя BRAБ225 с граничными условиями (а), область МЖ (б)

Принято:  $T_{внеш} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; корпус МЖГ находится при естественном охлаждении, на его поверхности задан коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 10 \text{ Вт/м}^2/\text{}^\circ\text{C}$ ; на оси вала отсутствует теплообмен (тепловой поток  $q=0$ ,  $\lambda \partial T_G / \partial n = 0$ ); по торцам вала задано  $\alpha = 300 \text{ Вт/м}^2/\text{}^\circ\text{C}$ ; коэффициенты теплопроводности: сталь - 51, алюминий - 116, магнит - 3, МЖ - 0,15  $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ ; удельные теплоемкости: сталь - 460, алюминий - 920, магнит - 650, МЖ - 1700  $\text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$ ; плотности: сталь - 7859, алюминий - 2780, магнит - 5000, МЖ - 1000  $\text{кг/м}^3$ ; вязкость МЖ  $\eta = 0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Принимаем:  $\gamma = \Delta v / \Delta r$  - радиальное изменение скоростей течения МЖ в элемент МЖ - скорость сдвига МЖ в элементе.

На рисунке 4.30 представлены расчетные сетки всего МЖГ и области МЖ. В области МЖ выделены 5 зон с разными удель-

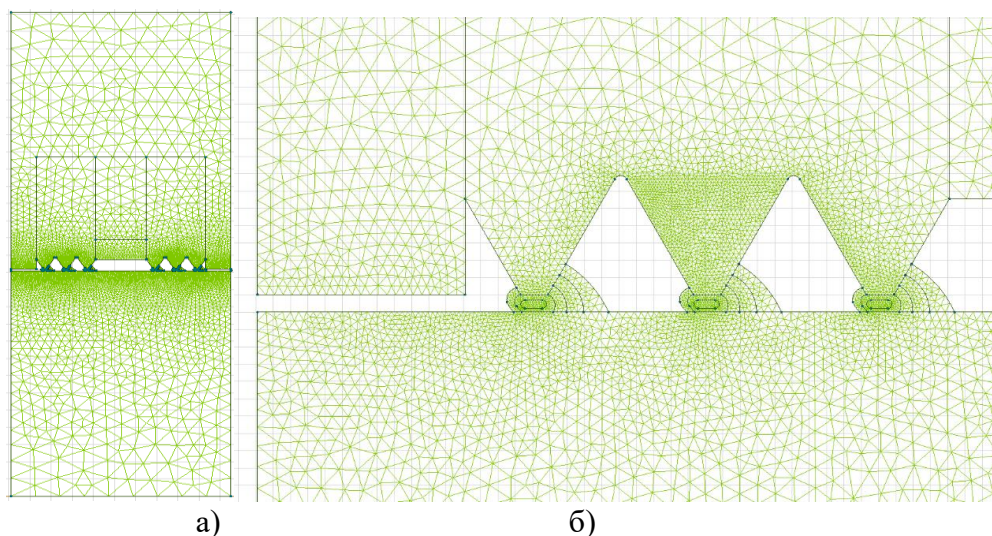


Рис. 4.30. Расчетные сетки МЖГ (а) и области МЖ (б)

ными потерями вследствие разных скоростей сдвига.



При  $n = 4000$  об/мин  $v_{\text{вал}} = 13,61$  м/с. В подобласти 1 (в зоне минимального зазора)  $\delta_1 = \delta_{\text{min}} = 0,25$  мм, тогда  $\gamma_1 = v_{\text{вал}} / \delta_1 = 54454,27 \text{ с}^{-1} \gg 1000 \text{ с}^{-1}$  поэтому  $\eta$  не зависит от  $\gamma$ . При  $\eta = 0,5$  Па·с объемная плотность тепловыделений в МЖ  $Q_1 = \eta \gamma_1^2 / 2 = 741316952,8$  Вт/м<sup>3</sup>. Данные по зонам сведены в таблицу 4.1.

**Таблица 4.1.** Данные для расчета теплового поля

Зона	$\delta_{\text{ср}}$ , м	$\gamma$ , 1/с	$Q$ , Вт/м <sup>3</sup>
1	0,00025	54454,27266	741316952,8
2	0,00035	38895,90904	378222935,1
3	0,00045	30252,3737	228801528,6
4	0,0007	19447,95452	94555733,77
5	0,0009	15126,18685	57200382,16

Шаг расчета по времени принят 360 с, рассчитывался процесс нагрева в течение 36000 с (10 часов). Результаты нагрева МЖГ по окончании процесса расчета представлены на рисунке 4.31. Температуры в сечениях МЖ пробки представлены на рисунке 4.32.

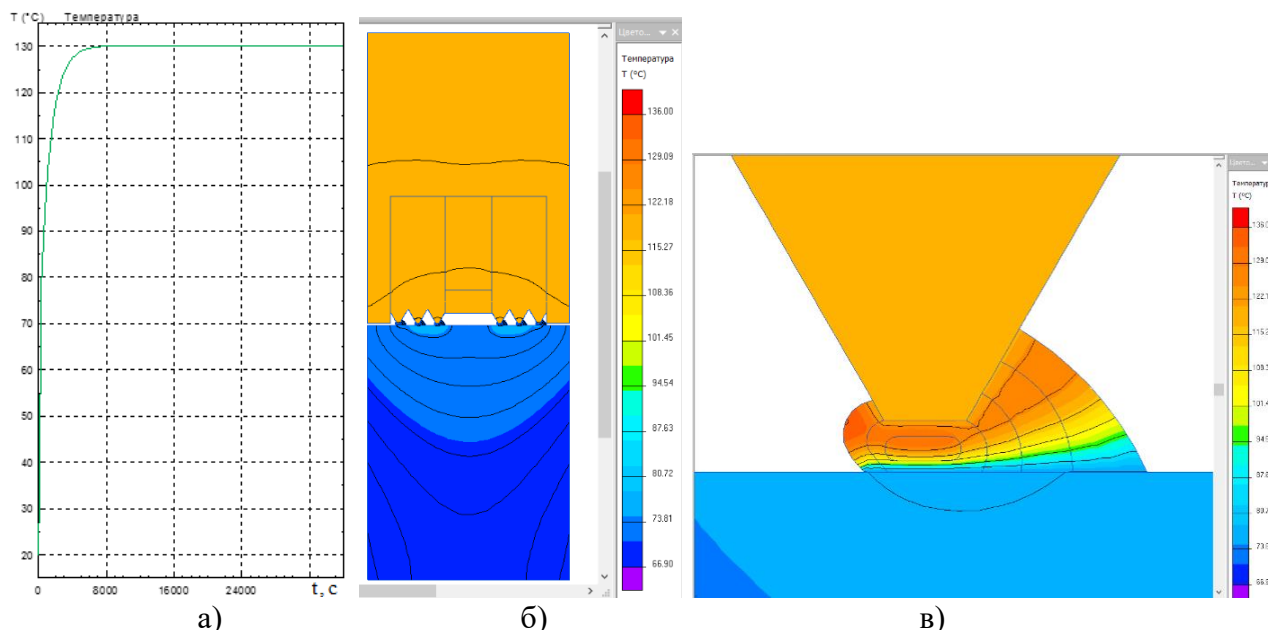


Рис. 4.31. Нагрев МЖГ при  $n = 4000$  об/мин и вязкости МЖ 0,5 Па·с:  
а - процесс нагрева МЖ под зубцом; б - изотермы в МЖГ; в - в области МЖ

Анализ результатов показывает, что процесс нагрева МЖГ при  $n=4000$  об/мин устанавливается через время  $t \sim 10000$  с, перепад температур между зонами МЖ может достигать  $60$  °С,  $T_{\text{МЖМАХ}}$  достигает  $132$  °С. По аналитическому соотношению (3.11)  $T_{\text{МЖМАХ}}=328,9$  °С, по соотношению (3.12)  $T_{\text{МЖМАХ}} = 97,22$  °С. Аналитические соотношения (3.11 и 3.12) дают результаты, отличающиеся

в 4 раза и в разные стороны от результата уточненного численного расчета. Использование эмпирического соотношения (3.13)  $T_{МЖ_{МАХ}} = T_{ВНЕШ} + \eta v^2 / (5\lambda)$  дает результат 143.5 °С, что достаточно близко к результату численного расчета.

Следует отметить, что только некоторые МЖ при температуре 150 °С МЖ сохраняют работоспособность. В этом примере выяснено, что рассматриваемый МЖГ с МЖ с

$\eta = 0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  по температурным условиям работоспособен до  $n=4000 \text{ об/мин}$ .

Однако в примере расчета не учтено изменение вязкости МЖ при изменении температуры и магнитной индукции. Это изменяет расчетные потери в МЖ и ее нагрев. Примем учет влияния:

- магнитной индукции на вязкость в виде  $\eta_{B>0} = \eta_{B=0}(1 + 2,65\sqrt{B})$  – индукция магнитного поля увеличивает вязкость и удельные тепловыделения. Значения магнитной индукции берутся из расчета магнитного поля;

- температуры на вязкость в виде  $\eta_T = 3\eta_{20}e^{-0.05T}$  – рост температуры снижает вязкость и удельные тепловыделения;  $e=2,718$  – основание натурального логарифма.

Таким образом  $\eta_{T,B} = 3\eta_{T=20,B=0}(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0.05T} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Примем МЖ с исходной вязкостью  $\eta_{T=20,B=0} = 0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  при магнитной индукции  $B = 0 \text{ Тл}$ , температуре  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда

$$\eta_{T,\gamma,B} = 3 \cdot 0,5(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0.05T} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad \gamma = \pi Dn / (60\delta) \text{ с}^{-1}, \quad D=0,065 \text{ м}$$

$$\text{и} \quad Q = \eta\gamma^2 / 2 = 0,75(1 + 2,65\sqrt{B})\gamma^2 e^{-0.05T} \text{ Вт/м}^3.$$

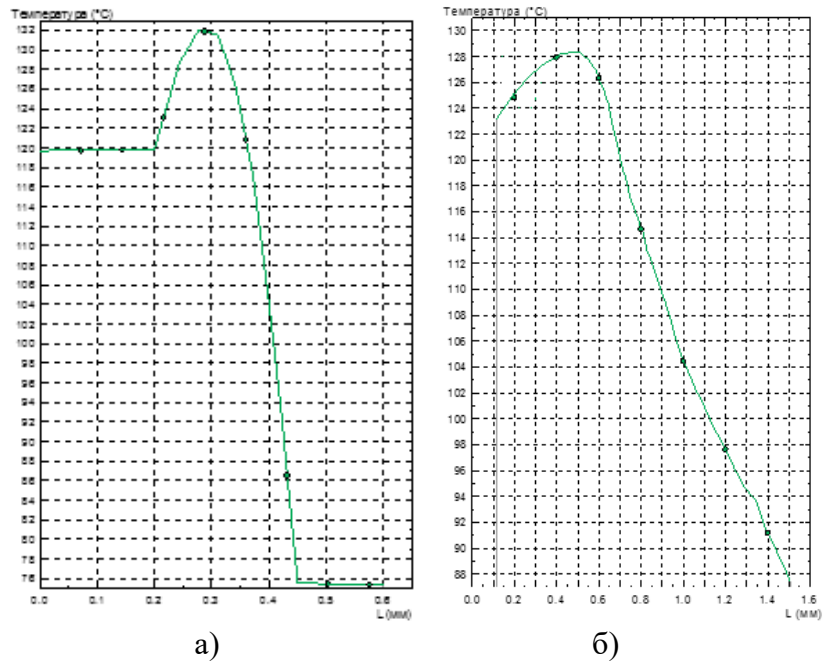


Рис. 4.32. Изменения температуры в МЖ при  $n=4000 \text{ об/мин}$ : по радиусу (а), по линии в середине зазора (б)

Проведем анализ теплового поля МЖГ АД для  $n = 11073,6$  об/мин  $v_{вал} = 37,67$  м/с. Расчет нелинейного теплового поля проводим с термозависимыми удельными тепловыделениями для зон. Данные по зонам для теплового расчета с учетом изменения вязкости сведены в таблицу 4.2. Значения  $B_{ср}$  в зонах МЖ взяты из магнитного расчета.

**Таблица 4.2.** Данные для расчета теплового поля с учетом изменения вязкости

Зона	$\delta_{ср}$ , м	$B_{ср}$ , Тл	$\gamma$ , 1/с	$\eta$ , Па·с	$Q$ , Вт/м <sup>3</sup>
1	0,00025	1,12	150674,59	$5,707446 \cdot e^{-0.05T}$	$64779634730 \cdot e^{-0.05T}$
2	0,00035	0,96	107624,67	$5,3946887 \cdot e^{-0.05T}$	$31243529170 \cdot e^{-0.05T}$
3	0,00045	0,72	83708,08	$4,8728993 \cdot e^{-0.05T}$	$17072307910 \cdot e^{-0.05T}$
4	0,0007	0,51	53812,35	$4,3387180 \cdot e^{-0.05T}$	$6281962853 \cdot e^{-0.05T}$
5	0,0009	0,38	41854,04	$3,9503545 \cdot e^{-0.05T}$	$3460038095 \cdot e^{-0.05T}$

Температурное изменение вязкости МЖ и  $Q$  для зоны 5 с учетом средней индукции в зоне представлено на рисунке 4.33.

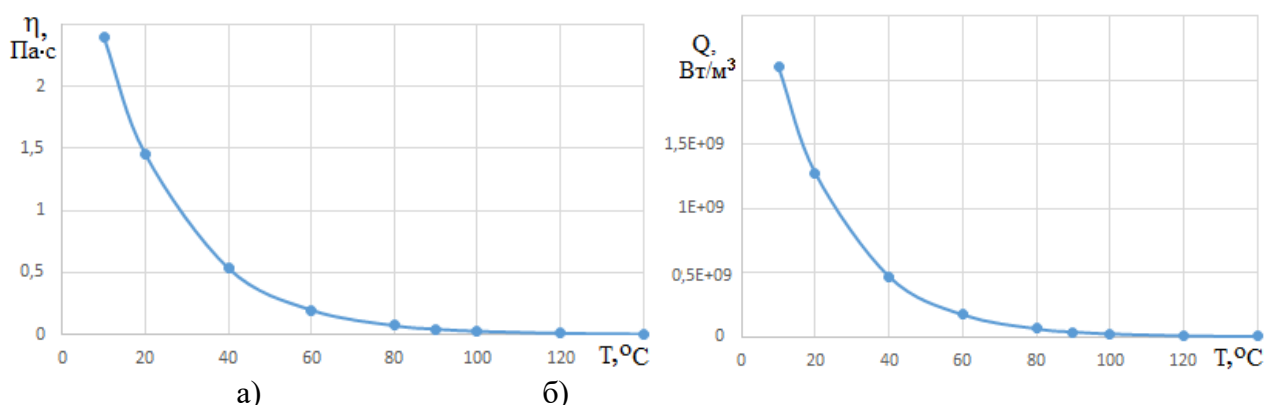


Рис. 4.33. Изменения вязкости МЖ (а) и удельных тепловыделений (б) с изменением температуры при учете средней магнитной индукции в зоне 5 для  $n = 11073,6$  об/мин

Рост температуры существенно снижает вязкость МЖ и удельные тепловыделения. Одновременно магнитная индукция повышает вязкость МЖ. Исходная вязкость МЖ  $\eta_{T=20, B=0} = 0,5$  Па·с, при  $T = 20$  °С и  $B = 0$  Тл, будет у МЖ при средней индукции в зоне 5  $B_{ср5} = 0,38$  Тл при температуре  $\sim 40$  °С.

Результаты нагрева МЖГ по окончании процесса расчета представлены на рисунке 4.34. Анализ результатов показывает, что  $T_{МЖМАХ}$  достигает  $102$  °С. Аналитические соотношения (3.11-3.13) дают неверные результаты. Неучет изменения вязкости МЖ с изменением  $T_{МЖ}$  и воздействия магнитной индукции по приводит завышенным расчетным перегревам МЖ. Уточненные расчеты показывают, что температурная работоспособность МЖГ может быть сохранена

даже при большей в 2 раза частоте вращения вала, чем определенная при постоянной вязкости МЖ.

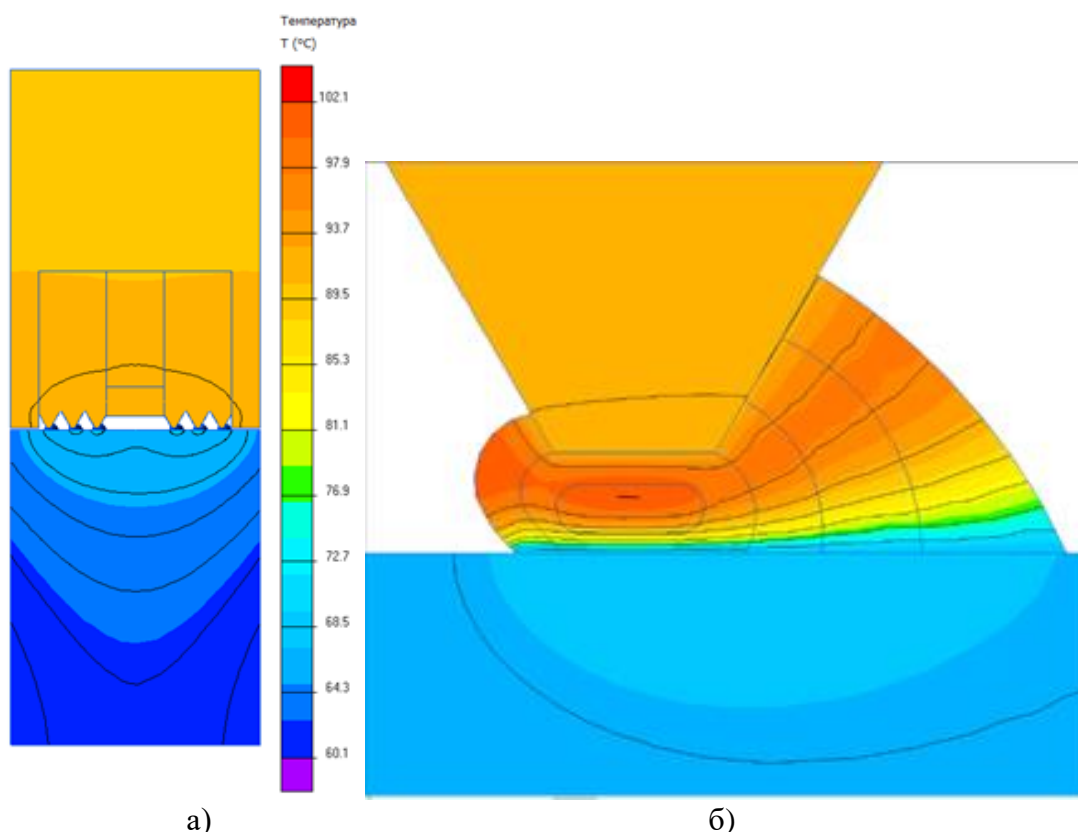


Рис. 4.34. Нагрев МЖГ при  $n = 11703,6$  об/мин и изменяющейся вязкости МЖ:  
а - изотермы в МЖГ; б - в области МЖ

Следует отметить, что расчеты теплового состояния МЖГ выполнены на основании решения уравнения теплопроводности для двухмерной задачи. В МЖГ МЖ вращается с валом в тангенциальной направлении, происходит некоторое перемешивание слоев (струй течения) МЖ и выравнивание температур,  $T_{\text{МЖМАХ}}$  будет меньше. Корректный анализ должен включать уточненный трехмерный магнито-тепло-гидродинамический расчет.

Нагрев МЖ снижает  $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}}$  вследствие температурного снижения магнитных свойств МЖ и магнита. Оценочное снижение составляет до  $-0,35 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  [24], т.е. при нагреве МЖГ на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$   $\Delta p_{v.\text{кр.мжг}}$  может снизиться до 35 %.

В практическом плане, чтобы повысить работоспособность в МЖГ регулируемых электродвигателей необходимо применять МЖ с  $\eta_{20} < 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Таким образом выполнено уточненное моделирование и расчетный анализ теплового состояния МЖГ.

#### 4.6. Учет шероховатостей деталей МЖГ при анализе приповерхностного распределения магнитного поля и определении площади контакта МЖ

После механической обработки на поверхностях деталей МЖГ образуются микронеровности. Рельеф поверхности состоит из чередующихся выступов и впадин. Из-за микронеровностей зазор в каждой точке окружности будет разным. Толщина слоя МЖ  $h$  больше  $\delta$  на величину суммы микронеровностей полюса  $R_{z1}$  и вала (втулки)  $R_{z2}$  (рис. 4.35). Из анализа микронеровностей  $R_{z1}$  и  $R_{z2}$  определяются максимальная высота выступов шероховатости  $R_{zMAX}$  и шероховатость поверхности  $Ra$ . Выступы на поверхностях перераспределяют магнитное поле в зазоре. Степень перераспределения зависит от формы и размеров выступов шероховатой поверхности и напряженности магнитного поля. Площадь контакта МЖ  $S$  с шероховатыми поверхностями деталей в зазоре МЖГ определяется суммой площа-

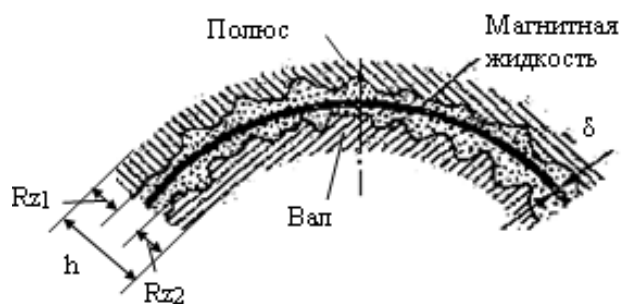


Рис. 4.35. Слой магнитной жидкости в зазоре

дей контакта внутренней поверхности полюса и наружной поверхности вала с МЖ. Поверхности полюса и вала при шероховатости изменяют приповерхностное распределение магнитного поля, увеличивают площадь контакта с МЖ и, соответственно, изменяют момент трения [55].

**Анализ распределения магнитного поля в зазоре МЖГ с шероховатыми поверхностями.** Принято, что поверхность втулки имеет выступы шероховатости с параметрами профиля  $Ra = 8.791$  мкм,  $Rz = 31.222$  мкм,  $S = 132.71$  мкм, а поверхность полюсной приставки выполнена гладкой. Такое упрощение задачи позволяет исключить влияние других факторов на распределение поля у шероховатой поверхности. Задача решалась методом конечных элементов в плоскомеридианной постановке. Расчетная сетка содержала 426000 узлов и имела переменную густоту. На удаленных границах расчетной области стороны элементов сетки составляли 1 мм, в приповерхностной зоне размеры элементов

сетки были минимальными, их стороны составляли 0.01 мм при зазоре  $\delta = 0.1$  мм.

На рисунке 4.36а показано распределение линий магнитного потока в тестовой модели МЖГ. Практически весь магнитный поток замыкается через рабочий зазор. При наличии неровностей распределение линий магнитного потока в зоне шероховатости представлено на рисунке 4.36б.

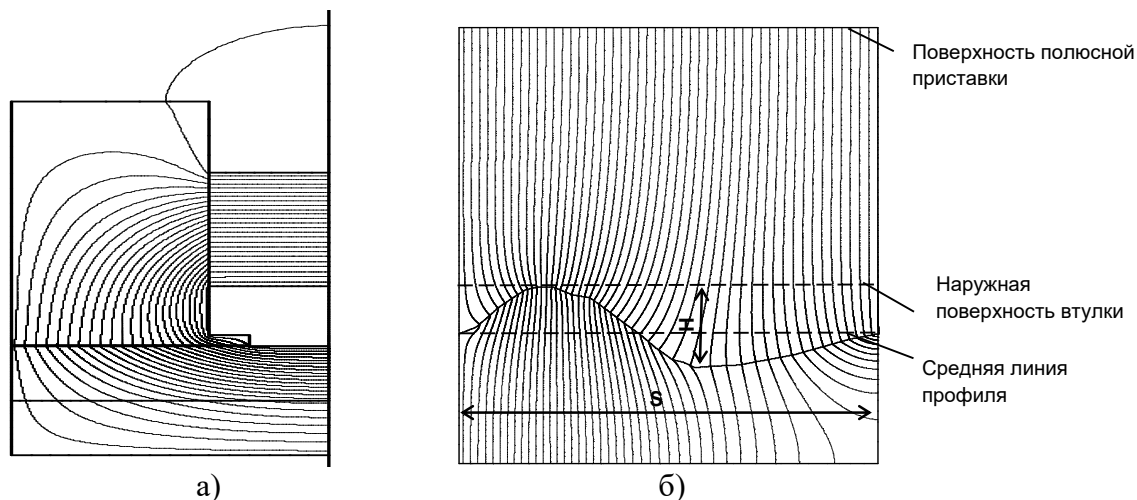


Рис. 4.36. Распределение линий магнитного потока в системе (а) и над шероховатой поверхностью с  $Ra=8,791$  мкм,  $Rz = 31.222$  мкм,  $S = 132.71$  мкм (б)

Заметно нарушение равномерности распределения магнитного потока при подходе к выступам шероховатости с их концентрацией у вершин выступов и соответствующем повышении  $H$  в зоне выступов. Во впадинах между выступами концентрация линий и  $H$  снижаются. На рис. 4.37 представлено распределение  $H$  на линиях параллельных поверхности над ней в зазоре и расположенных на расстоянии 1, 10 и 30 мкм над поверхностью.

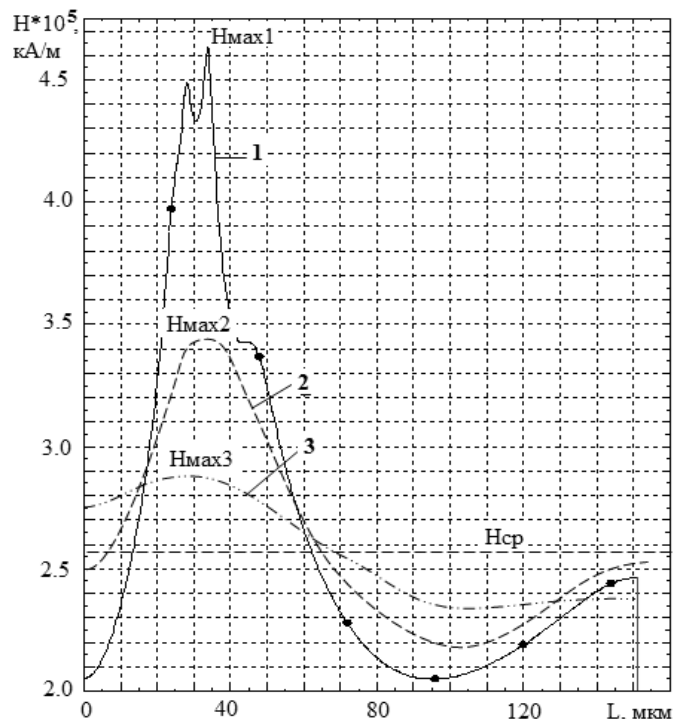


Рис. 4.37. Распределение напряженности магнитного поля над шероховатой поверхностью на расстоянии: 1 - 1 мкм, 2 - 10 мкм, 3 - 30 мкм

Перераспределение магнитного поля определяется формой и соотношением ширины и высоты выступов. На линии, расположенной на расстоянии 1

мкм над поверхностью  $H_{max}$  в 1.8 раза превышает  $H_{cp}$  в зазоре, а  $H_{min}$  – на 20 % ниже  $H_{cp}$ . При удалении от шероховатой поверхности неоднородность поля снижается, распределение  $H$  становится более сглаженными. На расстоянии высоты выступа ( $Rz = 31.222$  мкм) над поверхностью выступа  $H_{max}$  оказывается примерно на 10 % выше  $H_{cp}$ . Из анализа результатов следует, что неоднородность поля проявляется на глубину  $h > 2Rz$ , что влияет на свойства МЖ, момент трения и нагрев МЖГ.

**Моделирование поверхности с шероховатостью и площади ее контакта с МЖ.** Использовано трехмерное моделирование поверхностей по значениям  $Rz_1$ ,  $Rz_2$ ,  $Ra$ ,  $Rz_{MAX}$ , профилограмме и фотоснимку участка. На поверхности выбирается и фотографируется моделируемый участок размером 0.8 мм на 0.8 мм. Фотографии участка поверхности выполнялись на модернизированном металлографическом микроскопе МИМ-8 цифровой камерой с увеличением в 40 раз. Пример фотографии неровностей поверхности представлен на рисунке 4.38а. Моделирование поверхности проводилось в программе 3ds Max по плоскости с 100x100 элементами и заданным параметрам неровностей элементов. Использовалась функция Measure на вкладке Utilities, величина площади определялась в Surface Area. Трехмерная модель неровностей поверхности участка по заданными параметрам неровностей элементов в виде рендера поверхности представлена на рисунке 4.38б.

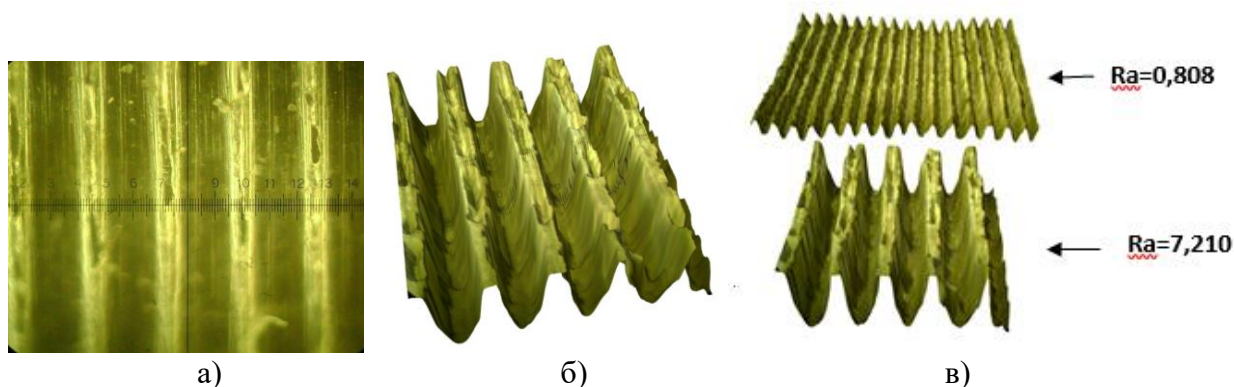


Рис. 4.38. Фотография (а) и трехмерная модель (б) неровностей поверхности, модели при разных  $Ra$  в мкм (в)

Расчет площади  $S$  контакта шероховатых поверхностей полюса и втулки с МЖ выполнялся по соотношениям

$$S = \frac{1}{2} b K^{\frac{2V}{2V+1}} \left( \frac{1}{D_1} \right)^{\frac{2V}{2V+1}}, \quad (4.29)$$

где

$$K = \left( \frac{1,06\pi(1-\mu^2)r_z^{0,5}}{K_2 V R_{Zmax}^{0,5} b} \right); \quad (4.30)$$

$$D_1 = \frac{2\pi}{\ell_{пр}\ell_{поп}} \left( c_1^2 + \frac{c_1^2 b_1 F(\lambda, K_0)}{\sqrt{a_1^2 - c_1^2}} + b_1 E(\lambda, K_0) \sqrt{a_1^2 - c_1^2} \right), \quad (4.31)$$

Здесь

$$K_0 = \frac{a_1^2(b_1^2 - c_1^2)}{b_1^2(a_1^2 - c_1^2)}; \quad \lambda = \arcsin \sqrt{\frac{a_1^2 - c_1^2}{a_1^2}}, \quad (4.32)$$

где  $F(\lambda_0, K_0)$  и  $E(\lambda_0, K_0)$  – эллиптические интегралы первого и второго рода,  $b$  и  $V$  – константы, характеризующие опорную кривую поверхности;  $r_z$  – радиус закругления выступов шероховатости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $K_2$  – коэффициент;  $\ell_{пр}$  и  $\ell_{поп}$  – длины волн для поверхностей полюса и втулки в продольном и поперечном направлениях;  $a_1 > b_1 > c_1$  – полуоси эллипсоида, описывающую кривую волнистости.

В результате моделирования выявлено, что по сравнению с гладкой поверхностью с шероховатостью  $Ra = 0,0$  мкм, увеличение  $Ra$  до 9,477 мкм приводит к повышению фактической площади контакта поверхности с МЖ  $S$  до 6,8 % (табл. 4.3). Одновременно необходимо учитывать, что при продолжительной работе МЖГ магнитные частицы МЖ могут забивать микровпадины поверхностей.

**Таблица 4.3.** Фактическая площадь контакта поверхности с МЖ

Ra, мкм	0.0	0,354	0,362	0,808	0,945	1,220	3,301	7,210	8,028	9,477
S, %	100	102,5	102,7	104,0	103,6	104,2	104,8	105,8	106,2	106,8

Таким образом разработана методика оценки профиля шероховатых поверхностей деталей МЖГ, выявлена глубина проявления неоднородности приповерхностного магнитного поля, определено увеличение площади шероховатой поверхности, контактирующей с МЖ.



#### 4.7. Исследование влияния вязкости МЖ, частоты вращения вала, шероховатостей деталей и времени работы на момент трения и нагрев МЖГ

Для моделирования и анализа нелинейного влияния на момент трения  $M_{тр}$  варьируемых факторов вязкости МЖ  $\eta$  и частоты вращения вала  $n$ , как наиболее влияющих, возможно использование методов планирования вычислительного эксперимента. Примем в качестве факторов:  $X_1 - \eta$ ,  $X_2 - n$ ; в качестве функции отклика  $\hat{y} - M_{тр}$ . Примем диапазоны варьирования факторов:  $\eta$  от 0,2 до 2,0 Па\*с;  $n$  от 556 до 2897 об/мин. Значения уровней факторов в именованных и кодированных значениях для заданных диапазонов представлены в таблице 4.4.

**Таблица 4.4.** Уровни варьируемых факторов и интервалы варьирования.

Уровни факторов и интервал варьирования	Кодированное значение	Именованное значение	
		$\eta$ , Па*с	$n$ , об/мин
	$x_i$	$X_1$	$X_2$
Максимальное значение фактора	+1	2	2897
Минимальное значение фактора	-1	0,2	556
Значение фактора в центре диапазона	0	1,1	1726,5
Диапазон варьирования фактора	$\Delta x_i$	1,8	2341
Интервал варьирования относительно центра	$\Delta x_i/2$	0,9	1170,5

Так как план ПФЭ при выраженных нелинейностях может давать значительную погрешность в центре плана [15] применим рототабельный центрально-ортогональный насыщенный план второго порядка с единичной областью планирования в виде правильного пятиугольника. Значения факторов в плановых точках приведены в таблице 4.5.

**Таблица 4.5.** Значения варьируемых факторов.

Значения факторов		
Кодированное значение	Натуральное значение	
$X$	$x_1$ , ( $\eta$ , Па*с)	$x_2$ , ( $n$ , об/мин)
1,0	2,0	2897
0,0	1,1	1726,5
0,309	1,3781	-
-0,809	0,3719	-
0,951	-	2839,6
0,5878	-	2414,5
-0,5878	-	1038,5
-0,951	-	613,4

Результаты вычислительных экспериментов с определением  $M_{тр}$  для тестовой модели МЖГ в шести плановых точках при шероховатости поверхности

вала  $Ra = 0,354$  мкм представлены в таблице 4.6.

**Таблица 4.6.** Значения  $M_{тр}$  в точках плана при  $Ra = 0,354$  мкм

U опыта	$\eta$ , Па*с	n, об/мин	$M_{тр}$ , Нм
1	2	1726,5	0,062
2	1,3781	2840	0,043
3	0,3719	2414,5	0,0269
4	0,3719	1038,5	0,0195
5	1,3781	613,4	0,0309
6	1,1	1726,5	0,0431

На основе обработки плана сформирован нелинейный полином, который для кодированных факторов имеет вид

$$\hat{M}_{тр} = 0,0431 + 0,0189X_1 + 0,00634X_2 + 5,88 \cdot 10^{-5}X_1X_2 - 2,1 \cdot 10^{-5}X_1^2 - 0,0113X_2^2.$$

Результаты расчета  $M_{тр}$  на основе полученного полинома в плановых точках и точность аппроксимации функции квадратичным полиномом представлены в таблице 4.7.

**Таблица 4.7.** Результаты определения  $M_{тр}$  в точках плана при  $Ra = 0,354$  мкм

U	$\eta$ , Па*с	n, об/мин	$M_{тр}$ , Нм	$\hat{M}_{тр}$ , Нм	$ M_{тр} - \hat{M}_{тр} $ , Нм
1	2	1726,5	0,062	0,062001314	1,314E-06
2	1,3781	2840	0,043	0,04299549	4,51E-06
3	0,3719	2414,5	0,0269	0,026898836	1,164E-06
4	0,3719	1038,5	0,0195	0,019497744	2,256E-06
5	1,3781	613,4	0,0309	0,030896172	3,828E-06
6	1,1	1726,5	0,0431	0,043102568	2,568E-06

Точность аппроксимации функции квадратичным полиномом при определении  $M_{тр}$  по полиному достаточно высокая. Погрешность определения  $M_{тр}$  в плановых точках не превышает 0,01 %. Из анализа коэффициентов уравнения следует, что с увеличением вязкости МЖ  $\eta$  и частоты вращения вала n  $M_{тр}$  МЖГ возрастает, так как коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  при факторах  $X_1$  и  $X_2$  положительные. Наибольшее влияние на  $M_{тр}$  оказывает  $\eta$  ( $b_1 > b_2$ ). Вязкость МЖ  $\eta$  оказывает влияние в  $b_1/b_2 = 0,0189/0,00634 = 2,94$  раза сильнее, чем частота вращения n. Коэффициент  $b_{12}$  при члене уравнения, учитывающем взаимодействие факторов, на два порядка меньше чем при факторах. Коэффициенты при квадратах факторов отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{M}_{тр} = -0,01817 + 0,021\eta + 3,88 \cdot 10^{-5}n + 5,59 \cdot 10^{-8}\eta n - 2,6 \cdot 10^{-5}\eta^2 - 9,685 \cdot 10^{-9}n^2.$$

Графическое отображение функции представлено на рисунке 4.39.

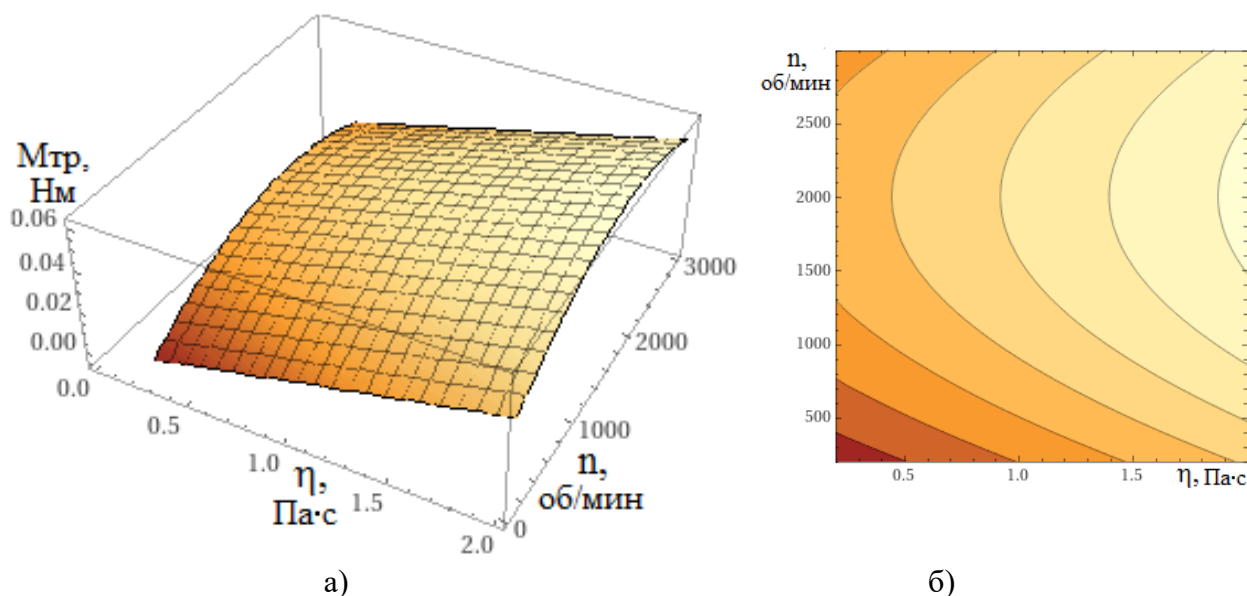


Рис. 4.39. Графическое представление зависимости  $M_{тр} = f(\eta, n)$  при  $Ra = 0,354$  мкм: а - поверхность функции; б - линии равных  $M_{тр}$

Результаты аналогичных процедур при шероховатости поверхности  $Ra = 8,028$  мкм представлены в таблице 4.8.

**Таблица 4.8.** Результаты в точках плана при  $Ra = 8,028$  мкм

U	$\eta$ , Па*с	n, об/мин	$M_{тр}$ , Нм	$\hat{M}_{тр}$ , Нм	$ M_{тр} - \hat{M}_{тр} $ , Нм
1	2	1726,5	0,087	0,087000546	5,462E-07
2	1,3781	2840	0,1108	0,11079013	9,87E-06
3	0,3719	2414,5	0,0569	0,056899713	2,865E-07
4	0,3719	1038,5	0,0409	0,04089569	4,31E-06
5	1,3781	613,4	0,0437	0,04369493	5,07E-06
6	1,1	1726,5	0,071	0,071003895	3,895E-06

Сформированный полином для кодированных факторов имеет вид

$$\hat{M}_{тр} = 0,071 + 0,0222X_1 + 0,0293X_2 + 0,0194X_1X_2 - 0,00625X_1^2 - 0,0000434X_2^2.$$

При большей шероховатости увеличение вязкости МЖ и частоты вращения вала приводит к большему возрастанию  $M_{тр}$ . Относительное влияние частоты вращения возросло и практически сравнялось с влиянием вязкости – коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  близки. Коэффициенты при квадратах факторах также отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{M}_{тр} = 0,00261 + 0,01\eta + 4,9 \cdot 10^{-6}n + 1,84 \cdot 10^{-5}\eta n - 0,00772\eta^2 - 3,17 \cdot 10^{-11}n^2.$$

Графическое отображение функции представлено на рисунке 4.40.

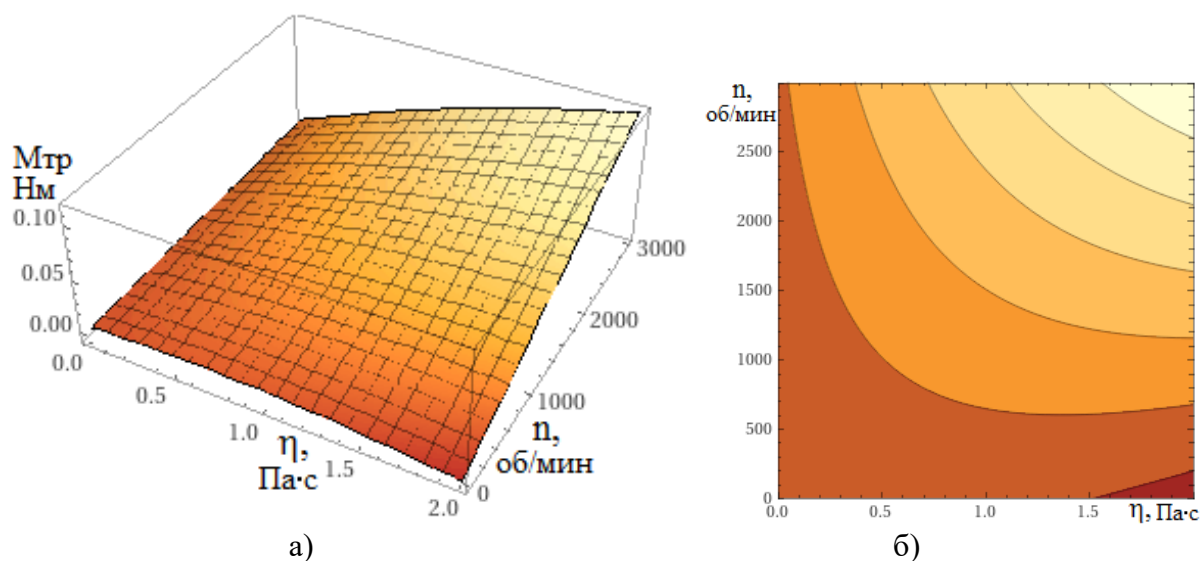


Рис. 4.41. Графическое представление зависимости  $M_{тр} = f(\eta, n)$  при  $Ra = 8,028$  мкм: а - поверхность функции; б - линии равных  $M_{тр}$

Для выявления влияния тех же факторов -  $\eta$  и  $n$ , в том же, что и ранее диапазоне варьирования факторов, на нагрев МЖ – температуру  $T_{мж}$  проведено аналогичное исследование на основе рассмотренного плана.

Результаты вычислительных экспериментов и точности аппроксимации функции квадратичным полиномом в плановых точках при шероховатости поверхности  $Ra = 8,028$  мкм представлены в таблице 4.9.

**Таблица 4.9.** Результаты в точках плана при  $Ra = 8,028$  мкм

U	$\eta$ , Па*с	n, об/мин	$T_{мж}$ , °С	$\hat{T}_{мж}$ , °С	$ T_{мж} - \hat{T}_{мж} $ , °С
1	2	1726,5	57	56,99989294	0,000107
2	1,3781	2840	72	71,99396063	0,006039
3	0,3719	2414,5	54	53,99934953	0,00065
4	0,3719	1038,5	40	39,99671022	0,00329
5	1,3781	613,4	35	34,99639685	0,003603
6	1,1	1726,5	54	54,00285703	0,002857

Сформированный полином для кодированных факторов имеет вид

$$\hat{T}_{мж} = 54,0 + 5,607X_1 + 17,368X_2 + 6,745X_1X_2 - 2,61X_1^2 - 2,201X_2^2.$$

Из анализа коэффициентов уравнения ожидаемо следует, что возрастание вязкости МЖ  $\eta$  и частоты вращения вала  $n$  увеличивают нагрев МЖ, так как  $b_1 > 0$ ,  $b_2 > 0$ , однако частота вращения в  $b_2/b_1 = 3,1$  раза влияет на нагрев сильнее, чем

вязкость. Коэффициенты при квадратах факторах отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{T}_{\text{МЖ}} = 25,0 + 2,264\eta + 0,01334n + 0,0064\eta n - 3,222\eta^2 - 1,607 \cdot 10^{-6}n^2.$$

Графическое отображение функции представлено на рисунке 4.42.

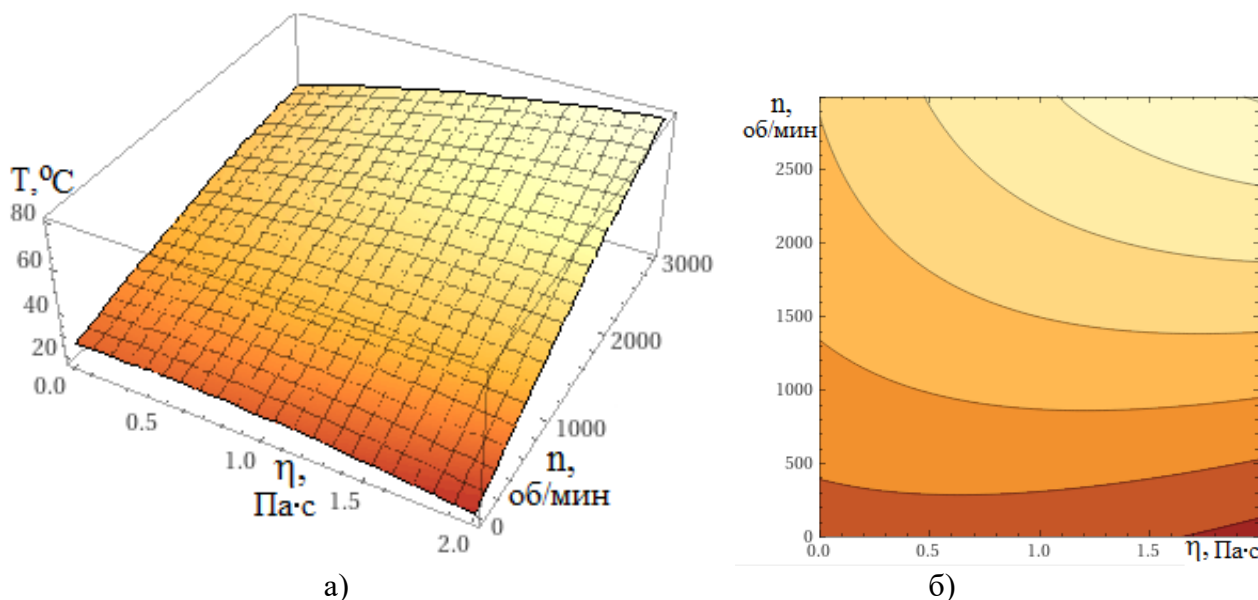


Рис. 4.42. Графическое представление зависимости  $T_{\text{МЖ}} = f(\eta, n)$  при  $Ra = 8,028$  мкм,  $t = 30$  мин: а - поверхность функции; б - изотермы

Результаты аналогичных процедур при шероховатости поверхности  $Ra = 0,354$  мкм представлены в таблице 4.10.

**Таблица 4.10.** Результаты в точках плана при  $Ra = 0,354$  мкм

U	$\eta$ , Па*с	n, об/мин	$T_{\text{МЖ}}$ , °С	$\hat{T}_{\text{МЖ}}$ , °С	$ T_{\text{МЖ}} - \hat{T}_{\text{МЖ}} $ , °С
1	2	1726,5	43	42,99970881	0,0002912
2	1,3781	2840	53	52,99563648	0,0043635
3	0,3719	2414,5	45	44,99918983	0,0008102
4	0,3719	1038,5	36	35,99760625	0,0023938
5	1,3781	613,4	32	31,9969764	0,0030236
6	1,1	1726,5	43	43,00223209	0,0022321

Сформированный полином для кодированных факторов имеет вид

$$\hat{T}_{\text{МЖ}} = 43,0 + 1,494X_1 + 10,1052X_2 + 3,0262X_1X_2 - 1,497X_1^2 - 0,912X_2^2.$$

Из анализа коэффициентов уравнения следует, что уменьшение вязкости МЖ снижает ее нагрев. При меньшей шероховатости поверхности влияние на нагрев МЖ частоты вращения существенно, в  $b_2/b_1 = 6,76$  раза, больше влияния

вязкости МЖ. Коэффициенты при квадратах факторах отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{T}_{мж} = 27,50 + 0,7667\eta + 0,00777n + 0,00287\eta n - 1,848\eta^2 - 6,656 \cdot 10^{-7}n^2.$$

Графическое отображение функции представлено на рисунке 4.43.

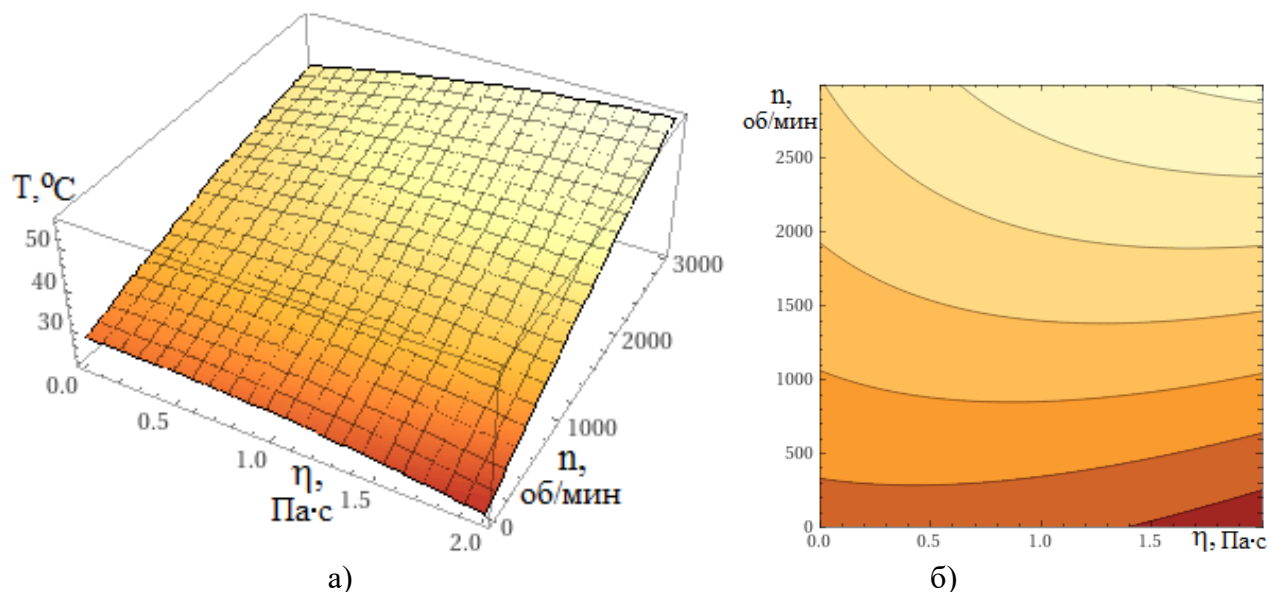


Рис. 4.43. Графическое представление зависимости  $T_{мж} = f(\eta, n)$  при  $Ra = 0,354$  мкм,  $t = 30$  мин: а - поверхность функции; б - изотермы

Для выявления нелинейного влияния на нагрев МЖ – температуру  $T_{мж}$  двух факторов: времени работы МЖГ  $t$  и частоты вращения вала  $n$ , проведено аналогичное исследование на основе рассмотренного плана. Значения факторов в плановых точках приведены в таблице 4.11.

**Таблица 4.11.** Значения варьируемых факторов.

Значения факторов		
Кодированное значение	Натуральное значение	
X	$x_1$ , (t, мин)	$x_2$ , (n, об/мин)
1,0	30,0	2897
0,0	15,0	1726,5
0,309	19,635	-
-0,809	2,865	-
0,951	-	2839,6
0,5878	-	2414,5
-0,5878	-	1038,5
-0,951	-	613,4
-1	0,0	556

Результаты вычислительных экспериментов и точности аппроксимации функции квадратичным полиномом в точках плана при вязкости МЖ  $\eta = 2,0$  Па·с

и шероховатости поверхности  $Ra = 8,028$  мкм представлены в таблице 4.12.

**Таблица 4.12.** Результаты в точках плана при  $Ra = 0,354$  мкм

U	t, мин	n, об/мин	$T_{МЖ}$ , °C	$\hat{T}_{МЖ}$ , °C	$ T_{МЖ} - \hat{T}_{МЖ} $ , °C
1	30,0	1726,5	57	57,00026443	0,000264
2	19,635	2840	72	71,99354451	0,006455
3	2,865	2414,5	40	39,99938166	0,000618
4	2,865	1038,5	33	32,99727019	0,00273
5	19,635	613,4	34	33,99634618	0,003654
6	15,0	1726,5	52	52,0028333	0,002833

Сформированный полином для кодированных факторов имеет вид

$$\hat{T}_{МЖ} = 52,0 + 12,279X_1 + 16,1022X_2 + 12,5414X_1X_2 - 7,2817X_1^2 - 2,33X_2^2.$$

Из анализа коэффициентов уравнения подтверждается ожидаемое возрастание нагрева МЖ при увеличении времени работы МЖГ и частоты вращения вала  $n$  - коэффициенты  $b_1$ , и  $b_2$  при  $X_1$  и  $X_2$  положительные. Несколько большее, в  $b_2/b_1 = 1,33$  раза, влияние на  $T_{МЖ}$  оказывает  $n$ . Коэффициенты при квадратах факторах отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{T}_{МЖ} = 22,12 + 0,55626t + 0,0089n + 0,00071tn - 0,03236t^2 - 1,7 \cdot 10^{-6}n^2.$$

Графическое отображение функции представлено на рисунке 4.44.

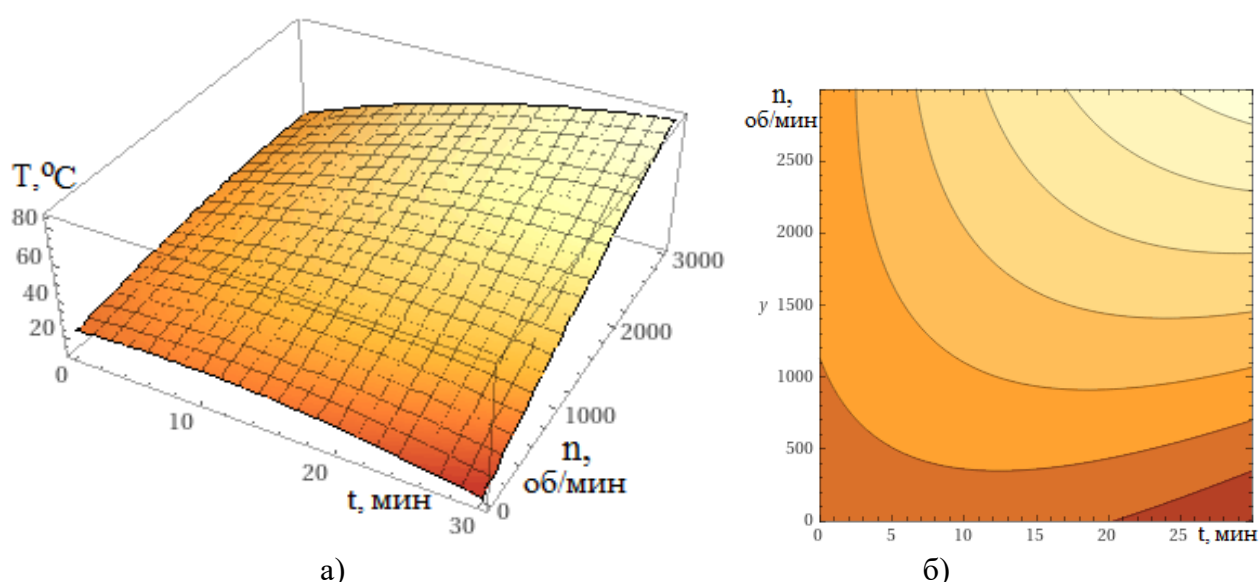


Рис. 4.44. Графическое представление зависимости  $T_{МЖ} = f(t, n)$  при  $Ra = 8,028$  мкм,  $\eta = 2,0$  Па\*с: а - поверхность функции; б - изотермы

Таким образом выявлено влияния вязкости МЖ, частоты вращения вала, шероховатости поверхностей, времени работы на момент трения и нагрев МЖГ.

## 4.8. Выводы

1. Установлено, что на работу МЖГ оказывают влияние электромагнитные процессы в электродвигателе посредством воздействия вращающегося магнитного потока торцевого рассеяния лобовых частей обмоток статора и ротора Фб на магнитный поток постоянного магнита МЖГ. При чугунном подшипниковом щите взрывозащищенного электродвигателя доля Фб, проникающего в МЖГ, возрастает в 1,8 раза по сравнению с немагнитным щитом. При стальном щите, применяемом для повышения прочности корпуса, доля Фб возрастет еще на 2,36 %. Сформированы зависимости проникающего в МЖГ Фб от нагрузочного тока электродвигателя. С ростом нагрузки электродвигателя проникающий в МЖГ Фб, снижается и в режиме пуска может изменить знак. Фб усиливает индукцию в зазоре МЖГ с постоянным магнитом под одной полюсной приставкой и ослабляет ее под другой до 14 %, что снижает критический удерживаемый перепад давлений МЖГ и критическую частоту вращения до 4,5 %.

2. На основе расчетных исследований влияния регулирующей обмотки на магнитный поток тестовой модели управляемого МЖГ с комбинированным возбуждением от постоянного магнита и регулирующей обмотки установлено, что изменением величины и направления тока регулирующей обмотки среднюю индукцию в зазоре МЖГ можно изменять с 0,49 Тл до 0,06 Тл, т.е. в 8,17 раза, что изменяет на магнитную силу, удерживающую МЖ в зазоре, критический удерживаемый перепад давлений, момент трения и нагрев МЖГ.

3. Разработанная модель удерживаемого перепада давлений МЖГ позволяет проводить его анализ с учетом структурной составляющей перепада давлений, перераспределения концентрации магнитных частиц на множестве зон МЖ, изменения локальных намагниченностей МЖ, достигающих 5 раз.

4. Установлено, что уточненный анализ свойств МЖГ при выявленном существенном различии скоростей сдвига слоев МЖ в разных зонах (до 5 раз), магнитных индукций ( $V_{\max}/V_{\min} \sim 3-5$ ), концентраций магнитных частиц (до 2 раз), вязкости МЖ (до 3 раз) должен включать нахождение критического положения и формы МЖ в зазоре, определение распределения поля скоростей течения МЖ,



расчет мощности потерь, моментов трения и теплового состояния МЖГ на множестве зон МЖ. Предложен подход к моделированию поведения МЖ обеспечивающий нахождение критического положения и формы МЖ, определение поля скоростей течений МЖ в зазоре МЖГ. В предельных режимах различие температур по зонам МЖ может достигать 60 °С. С ростом температуры МЖ удерживаемый перепад давлений снижается с интенсивностью до -0,35 %/°С.

5. Разработано моделирование профиля шероховатых поверхностей вала и полюсов МЖГ, глубины проявления неоднородности приповерхностного магнитного поля вследствие шероховатости поверхности, определено увеличение площади шероховатой поверхности, контактирующей с МЖ. Установлено, что неоднородность магнитного поля проявляется в зазоре до двойной величины микронеровности поверхности, увеличение шероховатости поверхности до 9,477 мкм приводит к повышению площади контакта поверхности с МЖ до 6,8 %, что повышает  $M_{тр}$  и нагрев МЖГ. Однако при продолжительной работе МЖГ магнитные частицы МЖ могут забивать микровпадины поверхностей.

6. Методами планирования вычислительного эксперимента на основе применения рототабельного центрально-ортогонального насыщенного плана второго порядка с единичной областью планирования в виде правильного пятиугольника сформированы и проанализированы нелинейные зависимости влияния вязкости МЖ  $\eta$ , величины шероховатости поверхности  $R_a$ , частоты вращения вала электродвигателя  $n$  на изменения  $M_{тр}$  и  $T_{мж}$ . Установлено:  $M_{тр}$  возрастает с увеличением  $\eta$  и  $n$ ,  $\eta$  оказывает влияние на  $M_{тр}$  в 2,9 раза сильнее, чем  $n$ ; повышение  $R_a$  увеличивает  $M_{тр}$ , влияние  $n$  на  $M_{тр}$  усиливается; повышение  $\eta$  и  $n$  увеличивают  $T_{мж}$ ,  $n$  влияет на  $T_{мж}$  в 3,1 раза сильнее, чем  $\eta$ ; при меньшей  $R_a$  влияние  $n$  на  $T_{мж}$  в 6,76 раза больше влияния  $\eta$ ; при увеличении времени работы  $t$  повышается  $T_{мж}$ , влияние  $t$  на  $T_{мж}$  в 1,33 раза меньше влияния  $n$ .

## **5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

### **5.1. Технологические способы снижения момента трения, повышения ресурса и надежности МЖГ вала электродвигателя**

**МЖГ валов электродвигателей с пониженным моментом трения.** Момент трения  $M_{\text{ТР}}$  - важнейший показатель МЖГ, определяющий потерю мощности в МЖ, внутренние тепловыделения и разогрев МЖГ. На  $M_{\text{ТР}}$  и ресурс работы МЖГ влияют конструктивные и режимные параметры: градиент скорости сдвига МЖ  $\gamma$  в зазоре; время работы  $t$ ; вязкость МЖ  $\eta$ ; температура  $T$ ; напряженность магнитного поля  $H$ ; величина зазора  $\delta$ , учитывающая волнистости и шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с МЖ; частота вращения вала  $n$ . В приповерхностном слое шероховатых поверхностей вала и полюсных приставок МЖГ происходит перераспределение магнитного потока, изменение эксплуатационных показателей.

Для МЖГ электродвигателей, работающих в тяжелых и загрязненных условиях, характерен повышенный  $M_{\text{ТР}}$  и небольшой межремонтный период службы валов электродвигателей, что обусловлено наличием повышенной шероховатостью поверхностей полюсных приставок и вала, контактирующих с МЖ. Поверхностный слой вращающегося вала изнашивается в результате воздействия на него слоя частиц пыли и абразивных материалов при попадании их в МЖГ. При этом разрушается только рабочая поверхность деталей (втулки, валы). Происходит износ вала, увеличение зазора, что приводит к снижению надежности герметизации, становится необходимым замена вала. В целях снижения  $M_{\text{ТР}}$  и увеличении межремонтного срока службы МЖГ валов электродвигателей возможно применение технологических способов усовершенствования [51,52,56] (рис. 5.1). МЖГ вала с пониженным моментом трения содержит: корпус 1 с крышкой 2; вал 3; магнит 4; полюсные приставки 5; дополнительная смен-

ная втулка 6 на валу; фиксирующую гайку 7; МЖ 8; немагнитную втулку 9, препятствующую прилипанию МЖ к магниту. Поверхности полюсных приставок снабжены концентраторами магнитного потока в виде зубцов. Применение сменной втулки 6 снижает износ вала. В этом случае вал можно изготавливать не из дорогостоящей стали 40Х13, а, например, из стали 45, а из стали 40Х13 изготавливать только сменные втулки.

Поверхности втулки и зубцов полюсных наконечников подвергаются термической обработке, механической или гальванической обработке и поверхностному пластическому деформированию твердосплавным, керамическим или алмазным выглаживанием для понижения высоты и шага неровностей шероховатой поверхности. Термическая обработка (закалка) стали включает нагрев до температуры 1050-1180 °С и отпуск в масле для снятия напряжений. После термообработки изменяется дислокационная структура зерен стали, происходит уменьшение их величины, плотность дислокаций зерен (рис. 5.2), микротвердость HV и износостойкость возрастают. При выглаживании поверхности выступы шероховатости сминаются, поверхность становится глаже, распределение магнитного поля около поверхности выравнивается, что снижает Мтр, Мстр и разогрев МЖ, увеличивается надежность и ресурс работы МЖГ, что важно при повышенных частотах вращения вала.

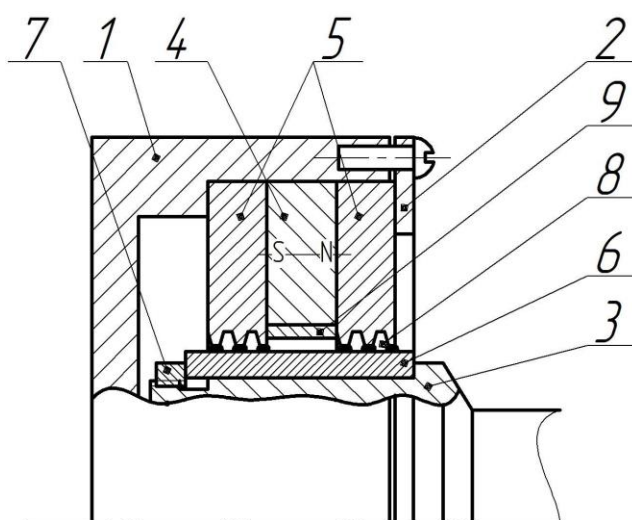


Рис. 5.1. Конструкция МЖГ вала электродвигателя с пониженным моментом трения

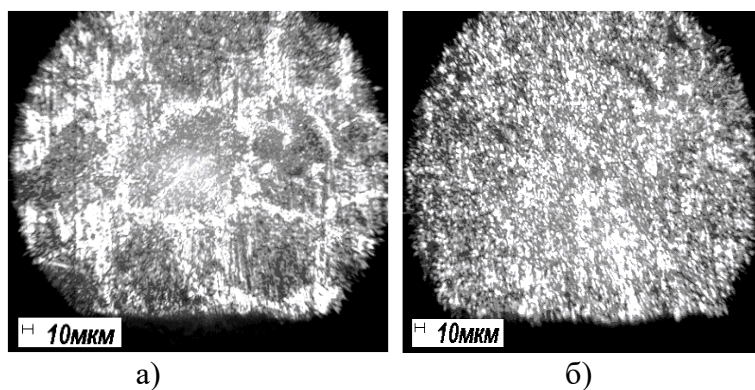


Рис. 5.2. Фотографии структуры стали сменной втулки: а – до термообработки; б – после термообработки

Алмазное выглаживание поверхностей проводилась на станке ИЖ 250 ИТВМФ1. Нагрузка на зону контакта составляла 50-300Н и измерялась проторированным индикатором. Во время испытаний измерялось количество циклов контакта (число оборотов). Взвешивание деталей для определения величины съема металла выполнялось на весах Mettler Toledo с точностью измерения 0,001 мг. Испытания на износ покрытий и поверхностей деталей проводились до достижения критического числа N циклов (числа оборотов), требовавшегося для катастрофического разрушения поверхностей деталей, которое и определяет износостойкость поверхности. Измерения микротвердости проводились микро-

твердомером ПМТ-3. Так после точения и последующего алмазного выглаживания микротвердость составляла 275 и 320 ед. HV, соответственно, а после закалки и последующего алмазного выглаживания – 545 и 630 ед HV (рис. 5.3). Измерение шерохова-

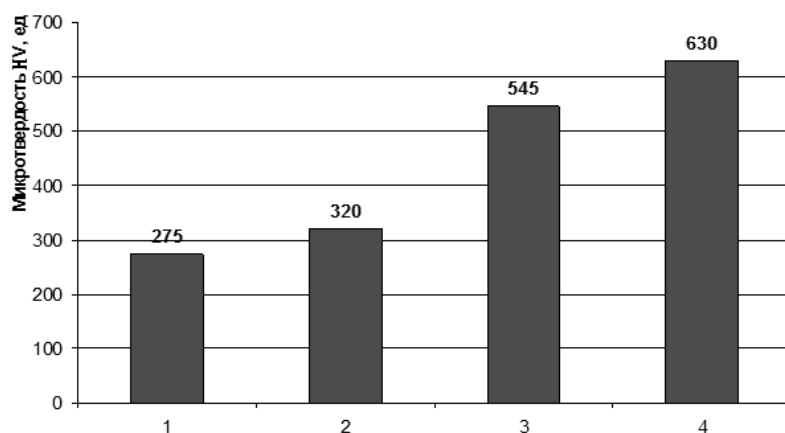


Рис. 5.3. Микротвердость поверхности втулки при:  
 1 - точении без термообработки;  
 2 - точении и алмажном выглаживании без термообработки;  
 3 - термообработке;  
 4 - термообработке, точении и алмажном выглаживании

тости наружной поверхностей Ra производилось на профилографе-профилометрах АБРИС-ПМ7 и БВ-7669 с записью на ЭВМ. На рисунке 5.4 представлена поперечная профилограмма шероховатости поверхности втулки, продольные профилограммы представлены на рисунке 5.5.

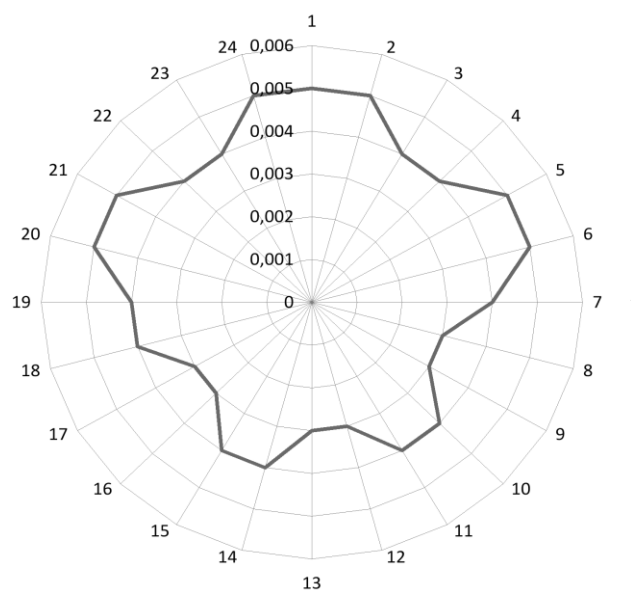
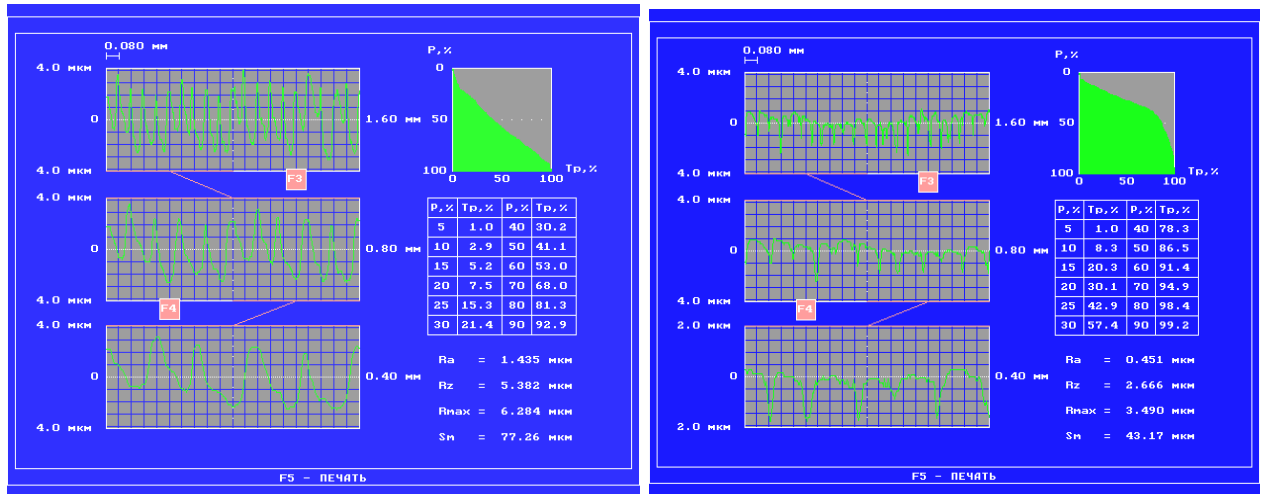


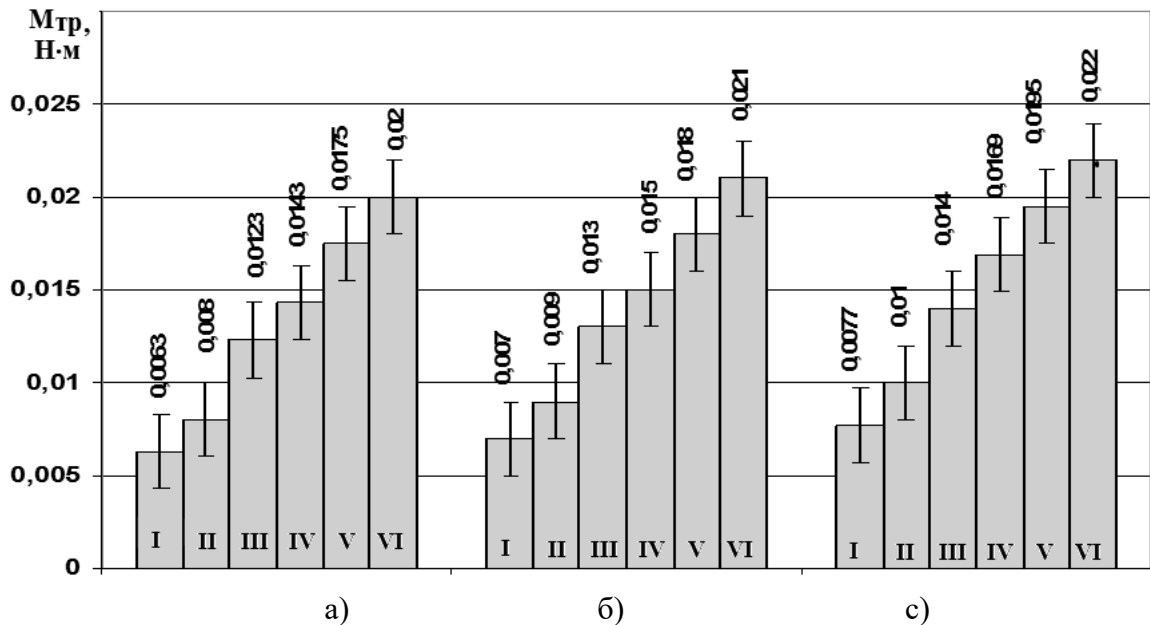
Рис. 5.4. Поперечная профилограмма шероховатости поверхности втулки



а)

б)

Рис. 5.5. Продольные профилограммы шероховатости поверхности втулки после: а – термообработки и точения; б - термообработки, точения и алмазном выглаживании

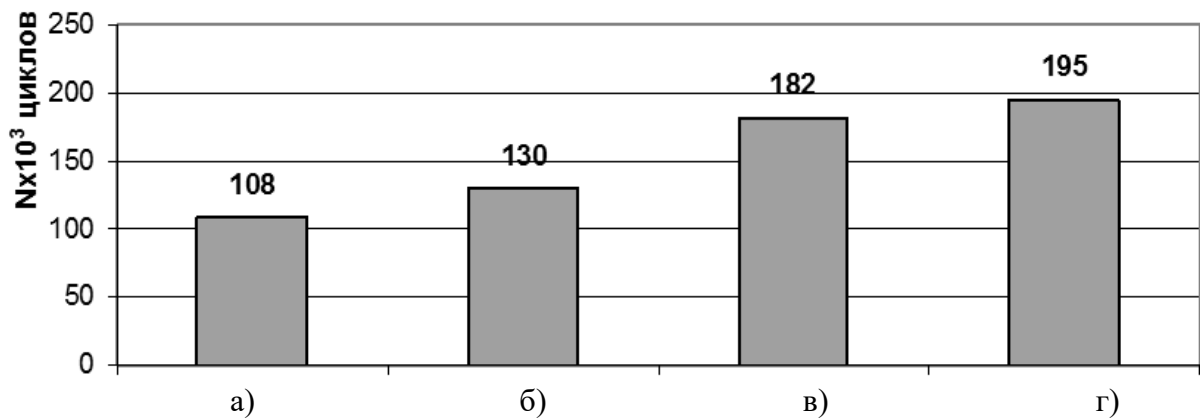


а)

б)

с)

Рис. 5.6. Значения Мтр МЖГ: а - Ra=0,451 мкм; б - Ra =0,540 мкм; с - Ra =1,435 мкм; I - n = 600 об/мин без МЖ; II - n = 600 об/мин с МЖ; III - n = 1200 об/мин с МЖ; IV - n = 1800 об/мин с МЖ; V - n = 2400 об/мин с МЖ; VI - n = 3000 об/мин с МЖ



а)

б)

в)

г)

Рис. 5.7. Гистограмма влияния обработки на износ поверхности сменной втулки при: а - точение без термообработки; б - точение и алмазное выглаживание без термообработки; в - термообработка и точение; г - термообработка, точение и алмазное выглаживание

Результаты, экспериментально подтверждающие снижение  $M_{тр}$  МЖГ предложенной конструкции, приведены на рис. 5.6-5.7. На рис. 5.5а представлены профилограммы шероховатости поверхности  $R_a$  при обработке поверхности сменной втулки из стали 40Х13 точением после термообработки, на рис. 5.5б - при последовательных процессах термообработки, точении и алмазном выглаживании. На рис. 5.6 представлены изменения  $M_{тр}$  МЖГ для разных  $R_a$  и частот вращения  $s$  и без наличия МЖ в МЖГ. На рис. 5.7 представлена гистограмма износа поверхности сменной втулки после операций обработки.

Из анализа результатов следует, что применение термообработки, точения и алмазного выглаживания обеспечивает наименьшую  $R_a$ . Исходная  $R_a$  поверхности сменной втулки из стали 40Х13 после точения составила 1,435 мкм, после алмазного выглаживания - 0,540 мкм, после термообработки, точения и алмазного выглаживания - 0,451 мкм. Таким образом обработкой поверхностей можно снизить  $R_a$  более, чем в 3 раза, что снижает  $M_{тр}$ . Применение сменной втулки и полюсных приставок с уменьшенной  $R_a$  приводит к снижению  $M_{тр}$  МЖГ на (10-20) %. Термообработка, последующая механическая обработка и алмазное выглаживание до 80 % увеличивают износостойкость. Таким образом, предложена конструкция МЖГ вала электродвигателя с пониженным моментом трения. Применение сменной втулки, термическая и механической обработка, пластическое деформирование поверхностей втулки и полюсных приставок дополнительно увеличивают межремонтный срок работы вала, ресурс работы МЖГ и, как следствие, надежность герметизации.

**Способ повышения ресурса и надежности МЖГ валов электродвигателей.** В целях повышения ресурса и надежности МЖГ валов электродвигателей обоснован способ, защищенный патентом на изобретение [50], при котором рекомендуется способ обработки поверхностей магнитопроводящих деталей МЖГ, аналогичный выше описанному, но дополнительно включающий полировку поверхностей и пластическое поверхностное деформирование с применением смазочно-охлаждающего технического средства (СОТС) в виде пасты, в состав которой входят: хлорид меди, вода, триэтанолламин, полиэтиленгликоль, уксусная

кислота, компоненты из высокодисперсных цветных металлов, в частности высокодисперсная медь в виде порошка частиц размерами 0,5-4,0 мкм. Применение СОТС облегчает пластическое деформирование обрабатываемой металлической поверхности, способствует удалению окисной пленки и осаждению медного покрытия. Медь связывает остальные компоненты СОТС на поверхности и удерживает их при трении деталей. Немагнитное медное покрытие дополнительно заполняет впадины шероховатой поверхности. Зоны повышенной напряженности магнитного поля, обусловленные шероховатостью поверхности, оказываются внутри немагнитного покрытия и не оказывают отрицательного действия на МЖ, так как на поверхности немагнитного покрытия следы перераспределения напряженности поля практически отсутствуют. Таким образом предложен способ повышения ресурса и надежности МЖГ валов электродвигателей вследствие повышения износостойкости поверхностей.

## **5.2. Физическая модель регулируемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей**

Для экспериментальных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели МЖГ валов регулируемых электродвигателей разработаны физическая модель регулируемого МЖГ и опытная установка [57,58] (рис. 5.8).

Физическая модель регулируемого МЖГ оснащена обмоткой с регулируемым, от управляемого источника питания, током возбуждения для изменения за счет создания дополнительного магнитного потока результирующего магнитного поля в зазоре МЖГ. Блоком управления электродвигателем регулируется частота вращения вала. Момент трения МЖГ через создаваемое плечевое усилие измеряется электронными весами. Термометр оснащен двумя термопарами, одна из них измеряет температуру МЖ в зазоре МЖГ, другая – температуру в помещении. На рис. 5.9 показана часть конструкции регулируемого МЖГ.

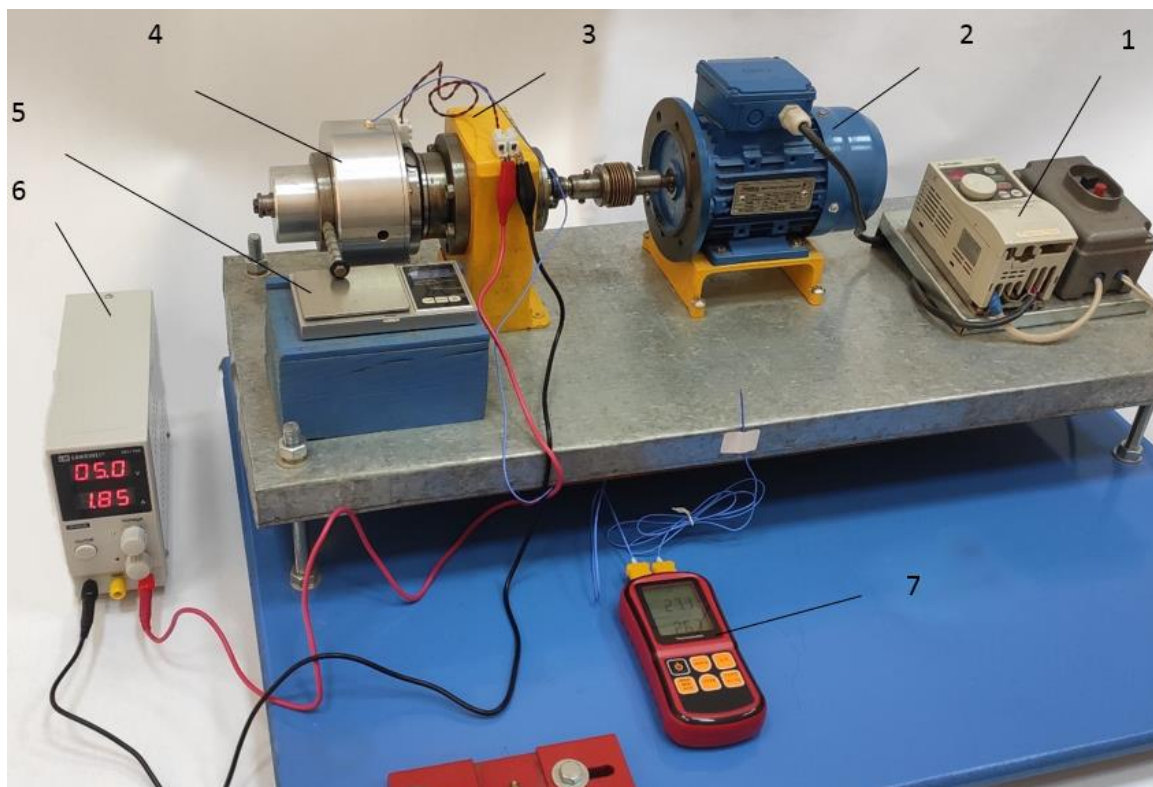


Рис. 5.8. Опытная установка: 1 – блок управление электродвигателем, 2 – электродвигатель, 3 – промежуточная стойка, 4 – МЖГ, 5 – электронные весы, 6 – управляемый источник питания обмотки МЖГ, 7 – термометр сигналов термопар

Для создания постоянного магнитного потока в МЖГ применены постоянные магниты в виде цилиндрических аксиально намагниченных элементарных магнитов, равномерно размещенных по окружности в обойме. Обмотка из  $W = 200$  витков намотана медным проводом с  $d_{пр} = 0,63$  мм с активным сопротивлением  $R_{кат} = 2,6$  Ом и индуктивностью  $L = 4,62$  мкГн (рис. 5.10). Площадь сечения обмотки  $177,5$  мм<sup>2</sup>. Обмотка МЖГ через выводы подключается регулируемому источнику питания. с напряжением до 5 В и токами до 2А.

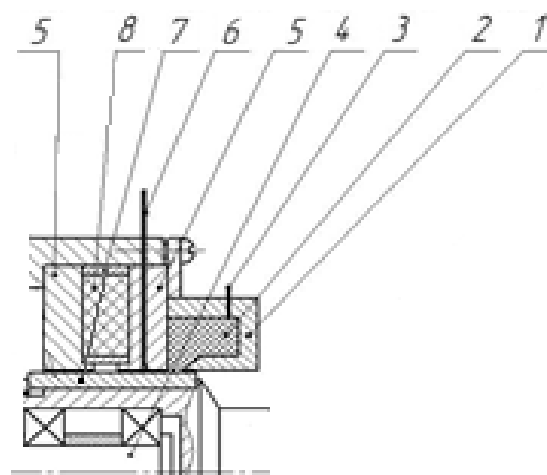


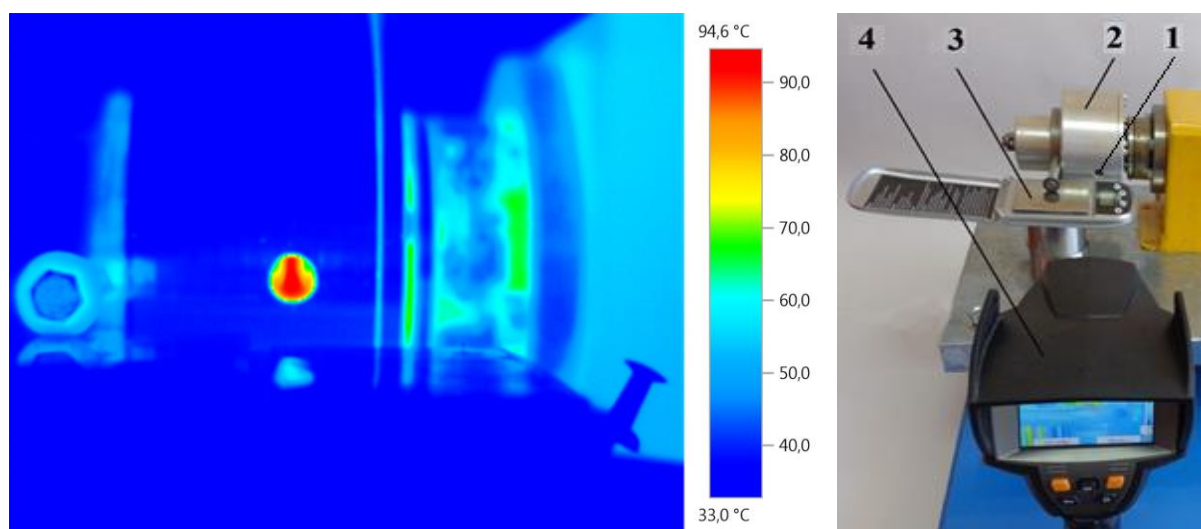
Рис. 5.9. Часть схемы регулируемого МЖГ: 1 – магнитопроводящий корпус; 2 – обмотка МЖГ; 3 - выводы обмотки; 4 - вал; 5 – полюсные приставки; 6 – термопара; 7 - втулка; 8 – магнит



Рис. 5.10. Регулирующая обмотка МЖГ



Температура МЖ также контролировалась в зазоре МЖГ тепловизором Testo 882 с размером матрицы 320x240 пикселей и температурной чувствительностью 50 мК через отверстие в корпусе (рис. 5.11).



а)  
б)  
Рис. 5.11. Фиксация температуры МЖ тепловизором: а - термограмма  
б – установка: 1 – отверстие в корпусе, 2 - МЖГ, 3 – электронные весы, 4 – тепловизор;

В установке конструктивно могут быть установлены постоянные магниты с разными магнитными свойствами, МЖ с разными магнитными и вязкостными характеристиками, сменные втулки с разной шероховатостью поверхности. Для исследования критического перепада давлений использовался резервуар сжатого воздуха с датчиком давления. Установка автоматизирована с управлением от ПК с контролем  $T_{мж}$ ,  $M_{тр}$ ,  $n$  и  $\Delta p$  (рис. 5.12).

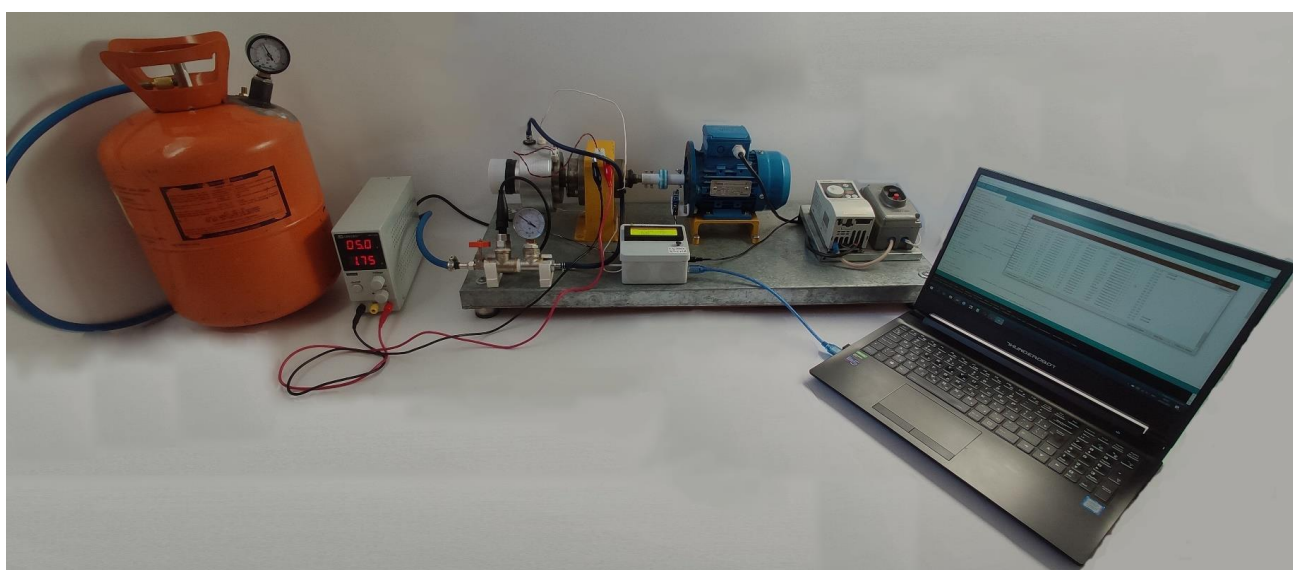


Рис. 5.12. Автоматизированная установка

На рисунке 5.13 представлен протокол программы при работе установки.

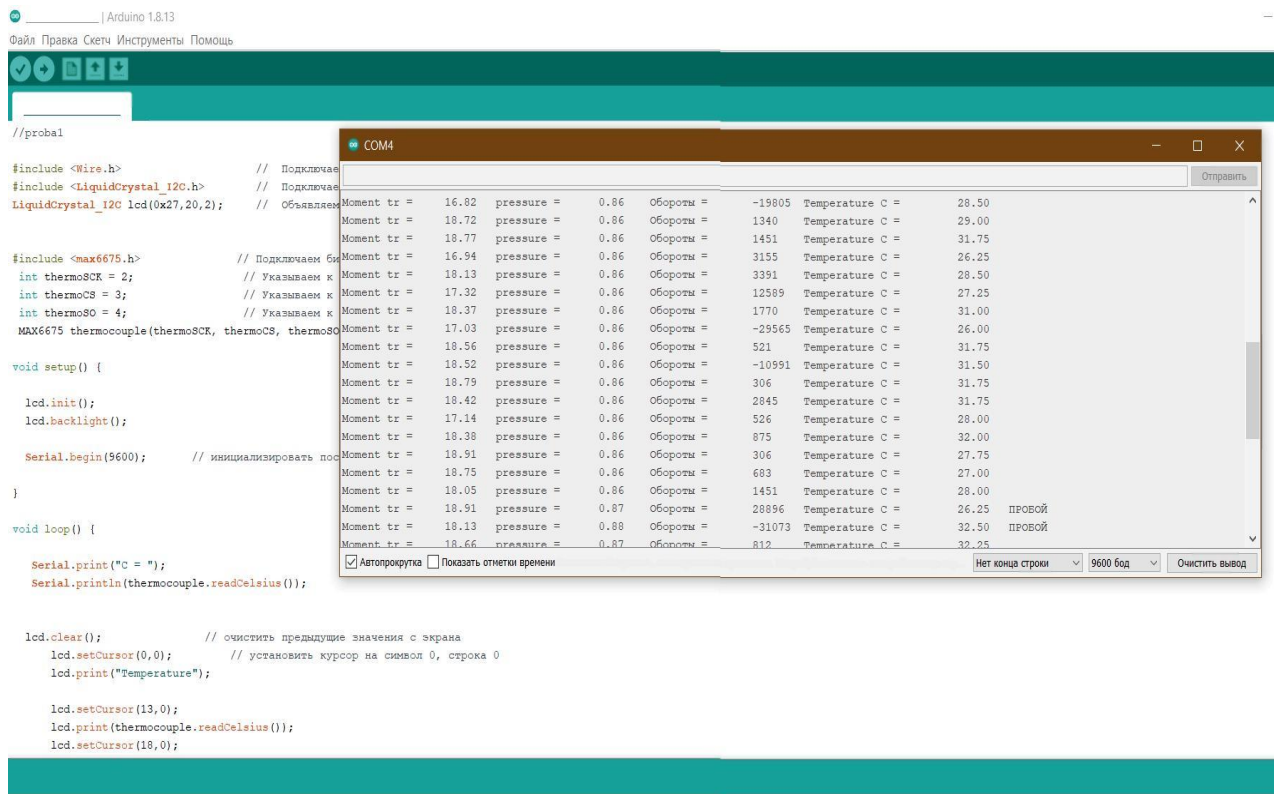


Рис. 5.13. Протокол работы программы автоматизированной установки

Таким образом на разработанной автоматизированной экспериментальной установке возможно проведение экспериментальных исследований влияния разных факторов на эксплуатационные показатели МЖГ.

### 5.3. Экспериментальные исследования магнитожидкостной герметизации валов на физической модели

Момент трения  $M_{тр}$  и нагрев  $T_{МЖ}$  - важнейшие эксплуатационные показатели МЖГ. Возрастание  $V$  в МЖ увеличивает  $\eta$ , возрастание  $n$  повышает  $\gamma$ . Оба эти фактора увеличивают вязкостные (диссипационные) потери в МЖ и ее разогрев. Предельная температура работоспособности МЖ  $T_{MAX} < (130-150) ^\circ C$  (для разных основ). При дальнейшем повышении  $T_{МЖ}$  начинается вскипание МЖ и потеря свойств герметизации. Вследствие невысокой теплопроводности МЖ, которая нелинейно зависит от  $T_{МЖ}$  и анизотропно зависит от  $H$ , внутри МЖ могут возникать области, где  $T_{МЖ}$  может превышать  $T_{MAX}$ , происходит потеря герметизирующих свойств МЖГ. С ростом  $T_{МЖ}$  нелинейно снижается ее  $\eta$ , что уменьшает вязкостные потери,  $M_{стр}$  и  $M_{тр}$ , которые определяет потерю мощности в

МЖГ. Таким образом, на  $\eta$ ,  $M_{стр}$ ,  $M_{тр}$ ,  $T_{МЖ}$  и ресурс работы МЖГ нелинейно влияют конструктивные и режимные параметры:  $n$ ;  $\gamma$ ; время работы  $t$ ; диффузия магнитных частиц;  $T_{внеш}$ ;  $H$ ;  $\delta$  с учетом шероховатости  $Ra$  поверхностей, контактирующих с МЖ. В связи с нелинейными и многообразными зависимостями свойств МЖГ валов электродвигателей от режима и условий работы на разработанном стенде проведено экспериментальное исследование влияния конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели МЖГ с целью оценки ресурса работоспособности и надежности герметизации МЖГ.

При исследованиях в качестве постоянных магнитов в МЖГ использованы наборные магниты на основе феррита стронция в виде семейства цилиндрических аксиально намагниченных элементарных магнитов диаметром 20 мм, равномерно размещенных по окружности в обойме (сепараторе), с  $B_r = 0,3$  Тл и  $H_j = 185$  кА/м. Исследования проводились с МЖ МКУ 030-40 с  $\eta = 0,5$  Па·с. При испытаниях использовались сменные втулки, изготовленные из сталей 3 и 40Х13 с разными шероховатостями поверхностей  $Ra$  от 0,354 мкм до 9,47 мкм.

На рис. 5.14 представлены зависимости изменения  $T_{МЖ}$  от  $t$  и  $M_{тр}$  от  $T_{МЖ}$  при испытаниях МЖГ с МЖ в зазоре, образованном втулкой с  $Ra=0,354$  мкм и полюсом с  $Ra=3,301$  мкм при  $n = 556, 1146, 1793, 2331$  и  $2897$  об/мин. На рис. 5.15 представлены аналогичные зависимости при зазоре, образованном втулкой с  $Ra=1,220$  мкм, том же полюсе и тех же  $n$ . На рис. 5.16 представлены аналогичные зависимости при зазоре, образованном втулкой с  $Ra=7,210$  мкм, том же полюсе и тех же  $n$ . На рис. 5.17 представлены графики изменения  $T_{МЖ}$  и  $M_{тр}$  в зависимости  $Ra$  поверхности втулки, том же полюсе и тех же  $n$ . На рис. 5.18 представлены зависимости  $M_{тр}$  от  $n$  при разных шероховатостях поверхностей полюса и втулки для МЖ с разными вязкостями [13,99,100].

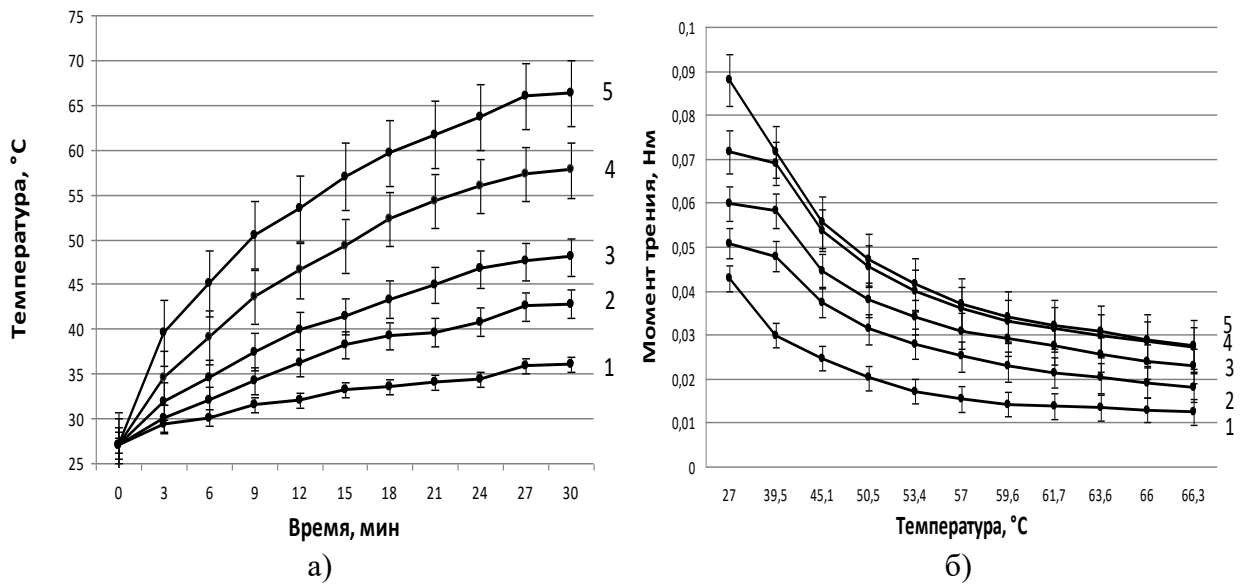


Рис. 5.14. Зависимость Тмж от t (а) и Мтр от Т (б) для втулки с Ra = 0.354 мкм и полюса с Ra = 3,301 мкм при частоте вращения вала:

1 - 556 об/мин; 2 - 1146 об/мин; 3 - 1793 об/мин; 4 - 2331 об/мин; 5 - 2897 об/мин

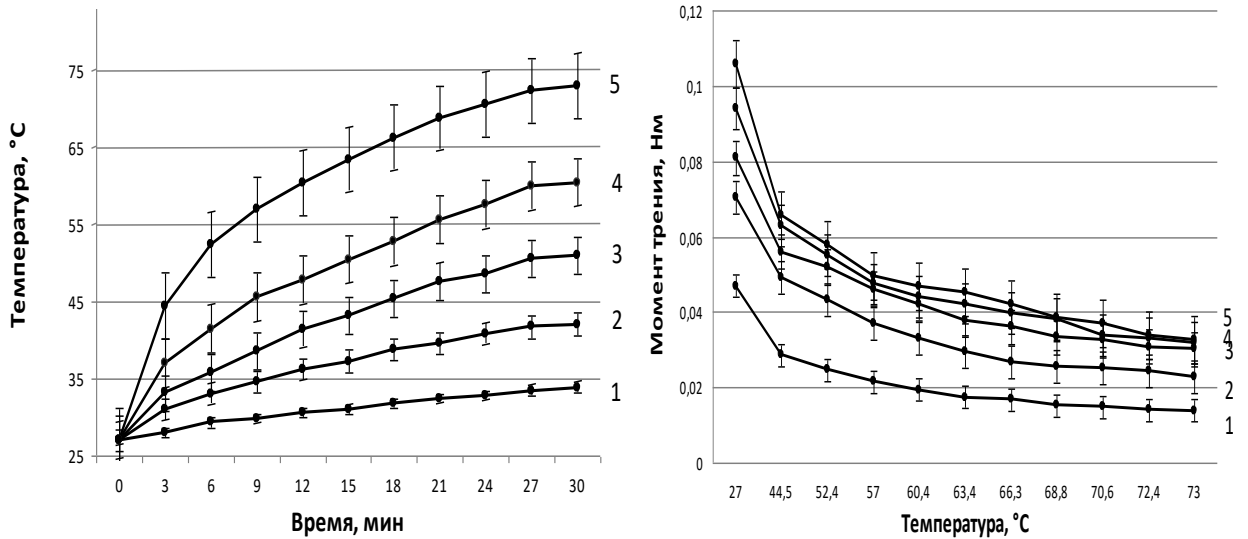


Рис. 5.15. То же при втулке с Ra = 1,220 мкм и полюсе с Ra = 3,301 мкм

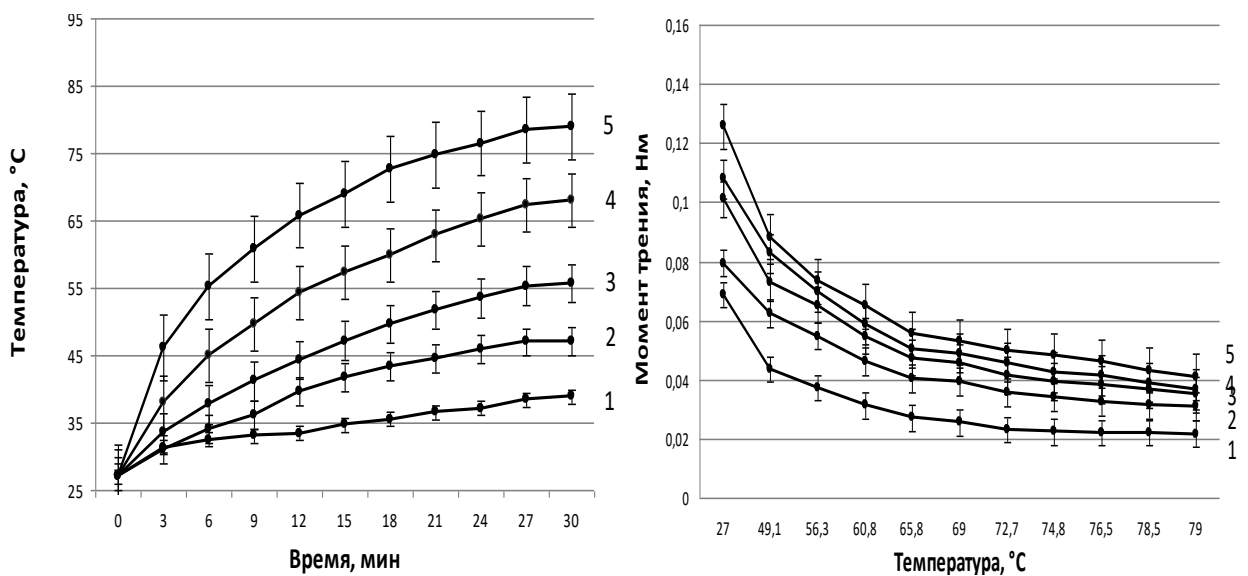


Рис. 5.16. То же при втулке с Ra = 7,210 мкм и полюсе с Ra = 3,301 мкм

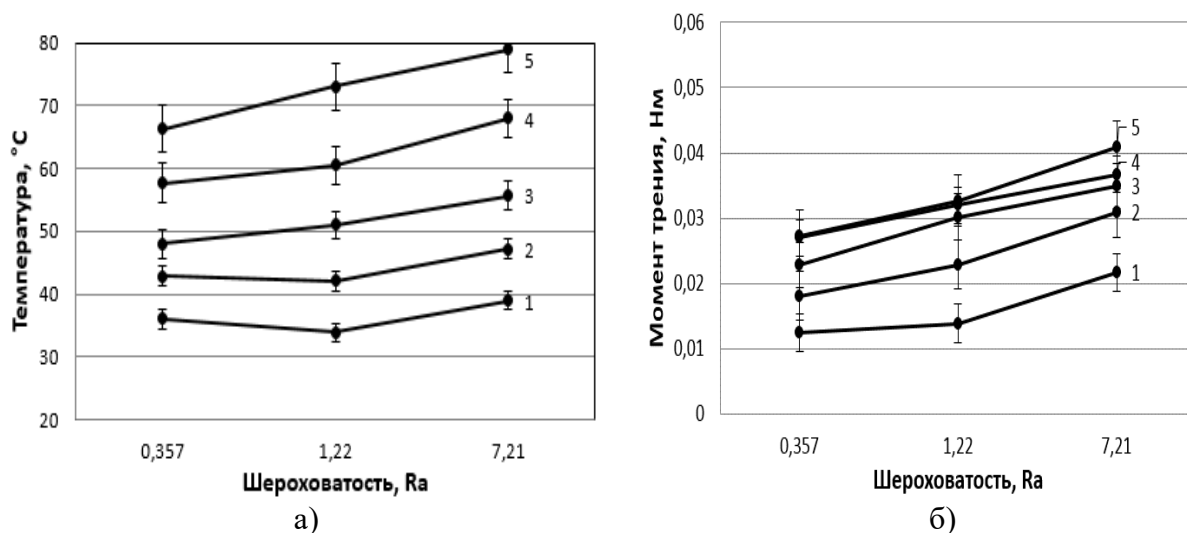


Рис. 5.17. Зависимость Тмж (а) и Мтр (б) от Ra втулки при полюсе с Ra = 3,301 мкм на 30-ой минуте работы и частоте вращения вала: 1 – 556 об/мин.; 2 – 1146 об/мин.; 3 – 1793 об/мин.; 4 – 2331 об/мин.; 5 – 2897 об/мин

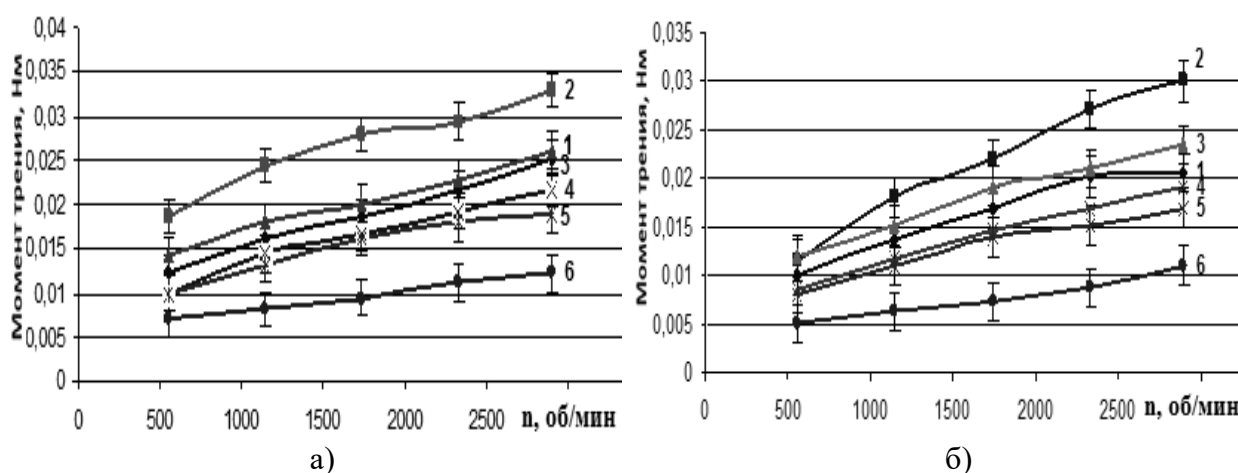


Рис. 5.18. Зависимость Мтр от n при полюсе с Ra = 3,301 мкм и втулках с Ra = 7,21 мкм (а) и 0,354 мкм (б) для МЖ с  $\eta$ , Па·с: 1 - 0,8; 2 – 2,0; 3 – 1,0; 4 – 0,6, 5 – 0,02; 6 – без МЖ

С ростом времени работы  $t$  происходит вязкостный разогрев МЖ, Тмж повышается. За время работы  $t = 30$  минут Тмж может повыситься в 2,5 раза, на 50 °С. Чем выше  $n$ , тем выше Тмж. При повышении  $n$  с 556 до 2897 об/мин – т.е. в 5,21 раза, Тмж может повыситься до 2 раз (с 33-38 до 67-78 °С). Чем выше Тмж, тем меньше  $\eta$  и Мтр. Так при повышении Тмж на 50 °С Мтр может снизиться до 3 раз. При повышении  $n$  в 5,21 раза (с 556 до 2897 об/мин) Мтр повышается в 1,85-2,2 раза. Так как  $\eta$  с изменением  $n$  и Тмж меняется нелинейно, разогрев во времени МЖГ тоже меняется нелинейно. Зависимости Мтр от Тмж и  $n$  нелинейные. Изменение шероховатости поверхностей, контактирующих с МЖ, вызывает

изменение  $M_{тж}$  и  $M_{тр}$  в разной степени. Например, при повышении  $Ra$  с 0,357 до 7,21  $mкм$   $M_{тж}$  может повыситься до 20 %, а  $M_{тр}$  – до 55 %. С увеличением  $n$   $M_{тр}$  увеличивается в 1,5-2 раза.

**Обработка экспериментальных данных методами планирования эксперимента.** Для обработки экспериментальных данных применен план полного факторного эксперимента (ПФЭ) для трех факторов - ПФЭ  $2^3$ . В качестве фактора  $X_1$  выбрано  $\eta$ , фактора  $X_2$  –  $n$ , фактора  $X_3$  –  $Ra$ , в качестве отклика функции  $\hat{y}$  –  $M_{тр}$  [15]. Значения уровней факторов в именованных и кодированных значениях для заданных диапазонов представлены в таблице 5.1.

**Таблица 5.1.** Уровни варьируемых факторов и интервалы варьирования.

Уровни факторов и интервал варьирования	Кодированное значение	Именованное значение		
		$\eta$ , Па*с	$n$ , об/мин	$Ra$ , $mкм$
	$x_i$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Максимальное значение фактора	+1	2	2897	8,028
Минимальное значение фактора	-1	0,2	556	0,354
Значение фактора в центре диапазона	0	1,1	1726,5	4,191
Диапазон варьирования фактора	$\Delta x_i$	1,8	2341	7,674
Интервал варьирования	$\Delta x_i/2$	0,9	1170,5	3,837

Оценка погрешности экспериментов и адекватности формирующихся полиномом может осуществляться в следующем порядке. Каждый  $U$  из  $N$  опытов, для исключения систематических ошибок, может быть повторен  $r$  раз. Рассчитываются средние значения  $y_{Ucp}$  в опытах и дисперсии опытов  $S_u^2$

$$y_{Ucp} = \frac{1}{r} \sum_{v=1}^r y_{Uv} \quad , \quad s_U^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{v=1}^r (y_{Uv} - y_{Ucp})^2 \quad .$$

По плану ПФЭ  $2^3$  проведено 8 опытов, каждый опыт  $U$  для исключения систематических ошибок повторялся  $r = 3$  раза. Результаты опытных значений  $M_{тр}$ , рассчитанные средние значения  $M_{тр.Ucp}$  по повторенным опытам и дисперсии опытов  $s^2_U$  приведены в таблице 5.2.

На основе дисперсий результатов опытов по критерию Кохрена для степеней свободы  $f_1 = r-1$  (если  $r=1$ , то принимают  $r-1=1$ ),  $f_2 = N$  и выбранном уровне значимости проверяется однородность дисперсий. Если однородность дисперсий подтверждается, то определяется дисперсия воспроизводимости опытов  $s^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N s_u^2$  и погрешность результатов опытов  $s(y) = \sqrt{s^2(y)}$ .

**Таблица 5.2.** Экспериментальные данные Мтр по трем опытам в каждой плановой точке и их расчетная обработка.

$U$	Мтр. $_{u1}$ , н*М	Мтр. $_{u2}$ , н*М	Мтр. $_{u3}$ , н*М	Мтр. $_{Уср}$ , н*М	$s^2_u$	$\widehat{M}_{тр.у}$ , н*М
1	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	<b><math>1,39 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,02095 \cdot 10^{-4}$	<b><math>1,4 \cdot 10^{-2}</math></b>
2	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	<b><math>3,89 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,0013 \cdot 10^{-4}$	<b><math>3,9 \cdot 10^{-2}</math></b>
3	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	<b><math>2,75 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,00665 \cdot 10^{-4}$	<b><math>2,8 \cdot 10^{-2}</math></b>
4	$8,06 \cdot 10^{-2}$	$8,12 \cdot 10^{-2}$	$8,21 \cdot 10^{-2}$	<b><math>8,13 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,0057 \cdot 10^{-4}$	<b><math>8,1 \cdot 10^{-2}</math></b>
5	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	<b><math>1,79 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,00105 \cdot 10^{-4}$	<b><math>1,8 \cdot 10^{-2}</math></b>
6	$6,15 \cdot 10^{-2}$	$6,21 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	<b><math>6,19 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,00105 \cdot 10^{-4}$	<b><math>6,2 \cdot 10^{-2}</math></b>
7	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$5,36 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	<b><math>5,27 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,00655 \cdot 10^{-4}$	<b><math>5,3 \cdot 10^{-2}</math></b>
8	$10,47 \cdot 10^{-2}$	$10,57 \cdot 10^{-2}$	$10,21 \cdot 10^{-2}$	<b><math>10,42 \cdot 10^{-2}</math></b>	$0,03455 \cdot 10^{-4}$	<b><math>10,4 \cdot 10^{-2}</math></b>

По значениям  $s_{umax}^2 = 0.03455 \cdot 10^{-4}$  и  $\sum_{u=1}^N s_u^2 = 0.0778 \cdot 10^{-4}$  рассчитано их отношение и для  $f_1 = 2, f_2 = 8$ , уровне значимости 0.05 по критерию Кохрена подтверждена однородность дисперсий повторенных опытов. Определены дисперсия воспроизводимости опытов  $s^2(y) = 0.009725 \cdot 10^{-4}$  и ошибка значений экспериментов  $s(y) = 0.09861 \cdot 10^{-2}$ .

Рассчитываются коэффициенты полинома  $b_i = \frac{\sum_{u=1}^N (x_{iu} y_u)}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}$ .

Полином для кодированных факторов принимает вид

$$\widehat{M}_{тр} = 0,04979 + 0,02179X_1 + 0,01664X_2 + 9,388 \cdot 10^{-3}X_3 + 4,538 \cdot 10^{-3}X_1X_2 + 2,089 \cdot 10^{-3}X_1X_3 + 2,638 \cdot 10^{-3}X_2X_3 - 2,663 \cdot 10^{-3}X_1X_2X_3 .$$

Находится погрешность определения коэффициентов  $s(b_i) = \frac{s(y)}{\sqrt{Nr}} = 0.0204 \cdot 10^{-2}$  и по выбранному критерию Стьюдента  $t_{St} = 2.12$  для числа степеней свободы дисперсии воспроизводимости для числа степеней свободы дисперсии воспроизводимости  $f = N(r-1) = 16$  и принятом уровне значимости 0,05 находится доверительный интервал значений коэффициентов  $\Delta b_i = t_{St} s(b_i) = 0.0432 \cdot 10^{-2}$ . Все коэффициенты полинома являются значимыми так как все они больше доверительного интервала при выбранном уровне значимости, в противном случае члены полинома с этими коэффициентами должны были быть отброшены. В полиноме остается число значимых коэффициентов  $N^*$ . Если все коэффициенты являются значимыми, то принимают  $N - N^* = 1$ .

Рассчитаны значения функции отклика  $\hat{y}$  для всех плановых точек  $N$  и

определена дисперсия адекватности полинома  $s_{АД}^2 = \frac{r}{N-N'} \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 = 0.0051 \cdot 10^{-4}$ . Адекватность сформированного полинома оценена по соответствию дисперсионного соотношения  $\frac{s_{АД}^2}{s^2(y)} = 1.5754$  табличным значениям критерия Фишера при заданных степенях свободы  $f=16$ ,  $f_{АД} = N - N' = 1$  (при  $N = N'$  принимается  $N - N' = 1$ ) и уровне значимости 0.05. Если дисперсионно отношение меньше значения критерия Фишера, то полином считается адекватным, он достоверно описывает функцию отклика и его можно использовать при анализе. Установлено, что уравнение является корректным.

Из анализа коэффициентов уравнения следует, что с увеличением вязкости МЖ  $\eta$ , частоты вращения вала  $n$  и шероховатости наружной поверхности втулки  $R_a$  момент трения  $M_{тр}$  МЖГ возрастает, так как коэффициенты  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  при  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  положительные. Наибольшее влияние на  $M_{тр}$  оказывает  $\eta$  ( $b_1 > b_2 > b_3$ ). Вязкость МЖ  $\eta$  оказывает влияние в  $b_1/b_2 = 2,179/1.664 = 1,32$  раза сильнее, чем частота вращения  $n$ . И в  $b_1/b_3 = 2,32$  сильнее, чем  $R_a$ . Коэффициенты при членах уравнения учитывающих взаимодействия факторов существенно меньше. Очевидно, что для уменьшения  $M_{тр}$  необходимо стремиться снижать  $\eta$ ,  $n$ ,  $R_a$ .

Зависимость  $M_{тр}$  от факторов в натуральных значениях имеет вид

$$\hat{M}_{тр} = 0,008823 + 0,009472\eta + 1,005 \cdot 10^{-5}n + 0,004046R_a + 7,068 \cdot 10^{-6}\eta n + 0,001742\eta R_a + 1,312 \cdot 10^{-6}n R_a - 6,587 \cdot 10^{-7}\eta n R_a .$$

Линейная модель при числе факторов  $k = 3$  может быть проиллюстрирована плоскостью в трехмерном пространстве при изменении 2 факторов и фиксации оставшегося на постоянных уровнях. Как в кодированном, так и натуральном значении, характер плоскости остается без изменения.

На рисунке 5.19 представлена поверхность отклика при изменении двух факторов ( $R_a$  и  $n$ ) при МЖ с  $\eta = 0,2$  Па\*с и при  $\eta = 2,0$  Па\*с.

Проверка соответствия расчетных результатов, полученных по линейному полиному, показала, что в вершинах куба расчетные и опытные результаты практически совпадают, но в центре факторного пространства наблюдается отклонение расчетных и опытных результатов, погрешность может достигать 7 % (табл.



5.3). Это объясняется нелинейным характером зависимостей, что не учитывает линейная модель. Поэтому для повышения точности представления целесообразно использовать планы факторного эксперимента второго порядка.

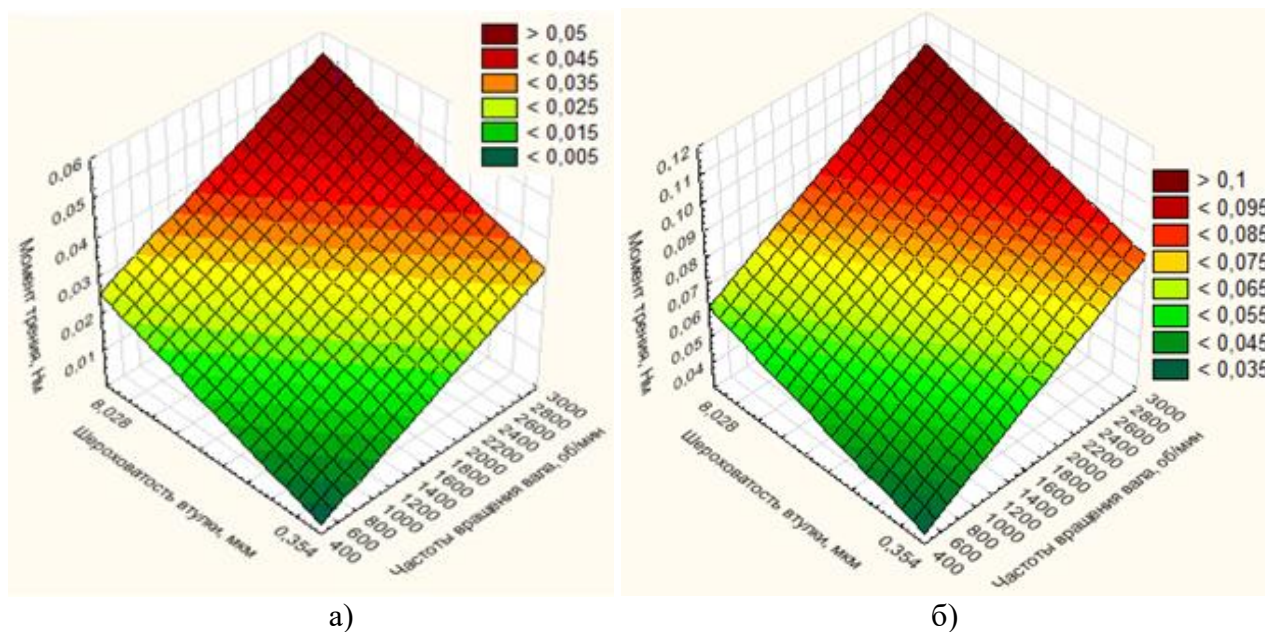


Рис. 5.19. Поверхности отклика  $M_{тр} = f(Ra, n)$ : а -  $\eta = 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; б -  $\eta = 2,0 \text{ Па}\cdot\text{с}$

**Таблица 5.3.** Значения  $M_{тр}$ ,  $\hat{M}_{тр}$  и погрешность применения линейной модели в центре плана для  $Ra = 0,354 \text{ мкм}$ ,  $\eta = 1,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $n = 1726,5 \text{ (об/мин)}$

	$M_{тр} \cdot 10^{-2}$	$\hat{M}_{тр} \cdot 10^{-2}$	Погрешность, %
Момент трения, Нм	4,31	4,04	6,26

При экспериментальном исследовании влияния тока регулирующей обмотки  $I_p$  на критический удерживаемый перепад давлений МЖГ вала  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  в физической модели управляемой электротехнической системе  $I_p$  изменялся от -3 А до +4 А. Опытные результаты представлены в таблице 5.4 и на рисунке 5.20.

При  $I_p = 0 \text{ А}$  магнитный поток в МЖГ не регулировался и создавался только внутренним магнитом,  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  уменьшался с 0,27 до 0,125 ати при увеличении частоты вращения  $n$  от 0 до 3180 об/мин, что соответствует физическим представлениям. При  $n=0$  и повышении  $I_p$  до +4 А  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  увеличился до 0,37 ати. При изменении направления и величины  $I_p$  до -3 А  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  снизился до 0,21 ати. Таким образом для  $n=0$  диапазон регулирования  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  при изменении  $I_p$  от -3 до +4 А составил  $(-7,8 \div +37) \%$ .

**Таблица 5.4.** Опытные значения критического удерживаемого перепада давлений МЖГ при изменении тока регулирующей обмотки и частоты вращения вала

n, об/мин I <sub>p</sub> , А	Δp <sub>v.кр.мжг</sub> , ати						
	0	556	1146	1739	2331	2897	3180
-3	0,21	0,19	0,18	0,16	0,14	0,11	0,1
-2	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,12	0,105
-1	0,25	0,23	0,21	0,19	0,16	0,13	0,115
0	0,27	0,25	0,23	0,2	0,17	0,14	0,125
1	0,3	0,27	0,24	0,215	0,18	0,15	0,135
2	0,33	0,29	0,26	0,23	0,19	0,155	0,14
3	0,35	0,31	0,27	0,24	0,195	0,16	0,145
4	0,37	0,33	0,29	0,25	0,2	0,17	0,15

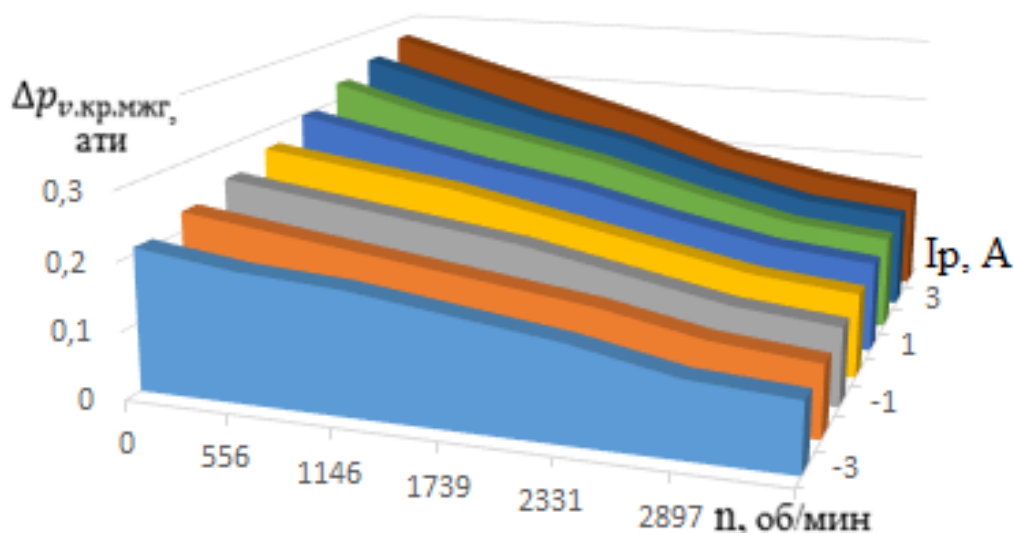


Рис. 5.20. Изменение Δp<sub>v.кр.мжг</sub> при изменении I<sub>p</sub> и n

При n = 3180 об/мин такое же регулирование I<sub>p</sub> вызвало подобное изменение Δp<sub>v.кр.мжг</sub> при несколько меньших значениях. Так при повышении I<sub>p</sub> до +4 А Δp<sub>v.кр.мжг</sub> увеличился с 0,125 ати до 0,15 ати. При изменении направления и величины I<sub>p</sub> до -3 А Δp<sub>v.кр.мжг</sub> снизился до 0,1 ати. Для n = 3180 об/мин диапазон регулирования Δp<sub>v.кр.мжг</sub> при изменении I<sub>p</sub> от -3 до +4 А составил (-20 ÷ +20) %.

Для формирования МОУ МЖГ и задания функциональной зависимости регулятора Δp<sub>v.кр.мжг</sub> = f(I<sub>p</sub>, n) на основе экспериментальных данных (табл. 5.4), анализа влияния факторов I<sub>p</sub> и n на Δp<sub>v.кр.мжг</sub> также применим рототабельный центрально-ортогональный насыщенный план второго порядка с единичной областью планирования в виде правильного пятиугольника. Значения уровней факторов в именованных и кодированных значениях представлены в таблице 5.5.

**Таблица 5.5.** Уровни варьируемых факторов и интервалы варьирования.

Уровни факторов и интервал варьирования	Кодированное значение	Именованное значение	
		Ip, А	n, об/мин
	$x_i$	$X_1$	$X_2$
Максимальное значение фактора	+1	4	3180
Минимальное значение фактора	-1	-3	0
Значение фактора в центре диапазона	0	0,5	1590
Диапазон варьирования фактора	$\Delta x_i$	7	3180
Интервал варьирования относительно центра	$\Delta x_i/2$	3,5	1590

Значения факторов в плановых точках приведены в таблице 5.6.

**Таблица 5.6.** Значения варьируемых факторов.

Значения факторов		
Кодированное значение	Натуральное значение	
X	$x_1$ , (η, Па*с)	$x_2$ , (n, об/мин)
1,0	4	3180
0,0	0,5	1590
0,309	1,5815	-
-0,809	-2,3315	-
0,951	-	3102,09
0,5878	-	2524,602
-0,5878	-	655,398
-0,951	-	77,91

Результаты экспериментальных данных для тестовой модели управляемого МЖГ в шести плановых точках представлены в таблице 5.7.

**Таблица 5.7.** Значения  $\Delta p_{v,kr,mzhg}$  в точках плана

U опыта	Ip, А	n, об/мин	$\Delta p_{v,kr,mzhg}$ , ати
1	4	1590	0,27
2	1,5815	3102,09	0,145
3	-2,3315	2524,602	0,135
4	-2,3315	655,398	0,19
5	1,5815	77,91	0,31
6	0,5	1590	0,23

На основе обработки плана сформирован нелинейный полином, который для кодированных факторов имеет вид

$$\Delta \hat{p}_{v,kr,mzhg} = 0,23 + 0,05907X_1 - 0,0757X_2 - 0,03573X_1X_2 - 0,01908X_1^2 - 0,02097X_2^2.$$

Результаты расчета  $\Delta p_{v,kr,mzhg}$  на основе полученного полинома в плановых точках и точность аппроксимации функции квадратичным полиномом представлены в таблице 5.8.

**Таблица 5.8.** Результаты определения в точках плана

U	$I_p$ , А	n, об/мин	$\Delta p_{v.кр.мжг}$ , ати	$\Delta \hat{p}_{v.кр.мжг}$ , ати	$ \Delta p_{v.кр.мжг} - \Delta \hat{p}_{v.кр.мжг} $ , ати
1	4	1590	0,27	0,270002056	2,06E-06
2	1,5815	3102,09	0,145	0,144983423	1,66E-05
3	-2,3315	2524,602	0,135	0,134986425	1,36E-05
4	-2,3315	655,398	0,19	0,189997591	2,41E-06
5	1,5815	77,91	0,31	0,309972257	2,77E-05
6	0,5	1590	0,23	0,230012696	1,27E-05

Точность аппроксимации функции квадратичным полиномом при определении  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  по полиному достаточно высокая. Погрешность определения  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  в плановых точках не превышает 0,01 %. Из анализа коэффициентов уравнения следует, что с увеличением  $I_p$   $\Delta p_{v.кр.мжг}$  возрастает, так как коэффициент  $b_1$  при факторе  $X_1$  положительный. С увеличением n  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  снижается, так как коэффициент  $b_2$  при факторе  $X_2$  отрицательный. Частота вращения влияет на  $\Delta p_{v.кр.мжг}$  примерно в 1,5 раза сильнее, чем  $I_p$ . Коэффициент  $b_{12}$  при члене уравнения, учитывающем взаимодействие факторов, отрицательный и в 2 раза меньше коэффициента  $b_2$ . Коэффициенты при квадратах факторах отрицательные, что свидетельствует о выпуклости функции.

Полином с факторами в натуральных значениях имеет вид

$$\Delta \hat{p}_{v.кр.мжг} = 0,2708 + 0,0286441I_p - 1,8 \cdot 10^{-5}n - 6,4 \cdot 10^{-6}I_p n - 0,00156I_p^2 - 8,3 \cdot 10^{-9}n^2.$$

Аналогичным образом на основе экспериментальных данных возможно формирование функциональной зависимости регулятора  $I_p = f(\Delta p_{v.кр.мжг}, n)$ .

Таким образом экспериментально подтверждена возможность регулирования критического удерживаемого перепада давлений МЖГ до (-20 до +20) % путем управления током регулирующей обмотки при разных частотах вращения. На основе экспериментальных данных методом планирования эксперимента может быть сформирована модель МЖГ для задания функциональной зависимости регулятора  $\Delta p_{v.кр.мжг} = f(I_p, n)$  или  $I_p = f(\Delta p_{v.кр.мжг}, n)$  в системе управления удерживаемым МЖГ перепадом давлений.

#### 5.4. Разработка усовершенствованного магнитожидкостного герметизатора вала взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225

На Ярославском электромашиностроительном заводе «ЭЛДИН» выпускаются взрывозащищенные электродвигатели с установкой МЖГ валов. Для взрывозащищенного двигателя марки ВРАБ с высотой оси вращения 225 мм и мощностью 30, 37 или 45 кВт в зависимости от числа пар полюсов, с участием автора разработан (рис. 5.21) и изготовлен (рис. 5.22) на диаметр выходного конца вала 65 мм усовершенствованный МЖГ, заправленный МЖ, производимой в ИГЭУ.

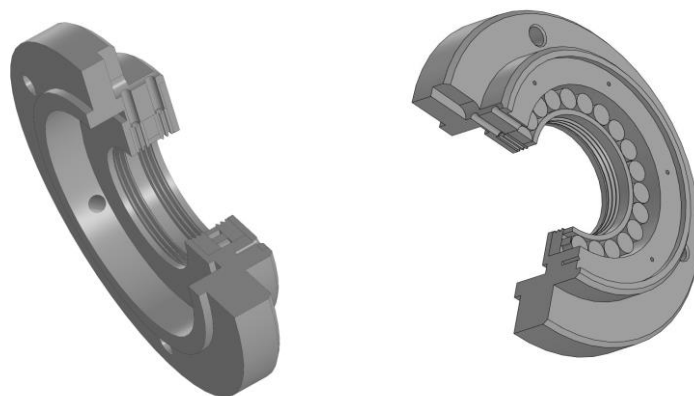


Рис. 5.21. Разработанная твердотельная 3D модель МЖГ в системе КОМПАС

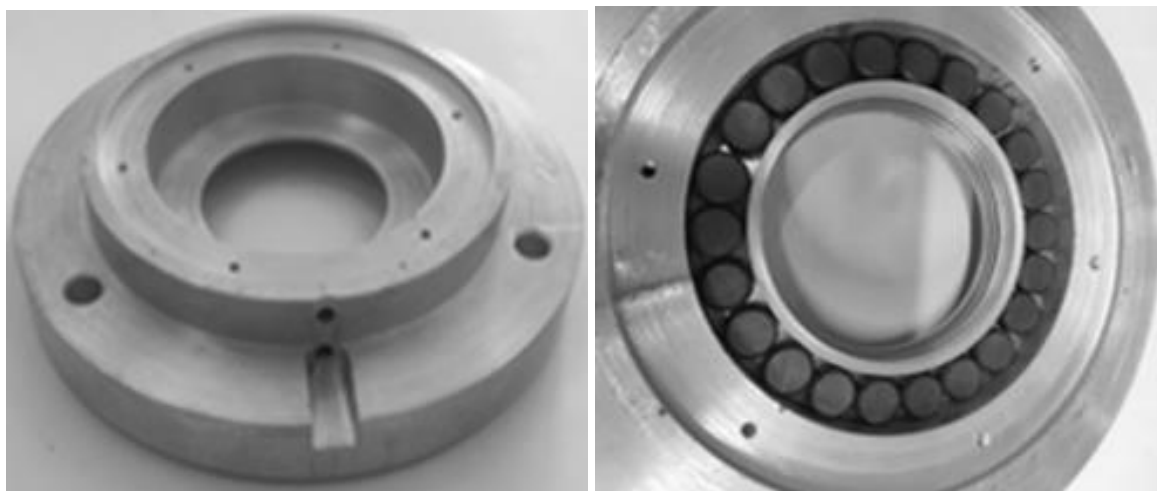


Рис. 5.22. Фото изготовленного МЖГ

Усовершенствованный МЖГ установлен на двигатель и испытан в условиях завода. Результаты испытаний подтвердили повышенную надежность герметизации и сниженный момент трения, о чем получен акт внедрения Ярославского электромашиностроительного завода «ЭЛДИН» (см. Приложение).

## 5.5. Выводы

1. Разработанные патентозащищённые, экспериментально обоснованные, технологические способы совершенствования МЖГ обеспечивают снижение момента трения, повышение износостойкости и срока службы, надежности МЖГ.

2. Разработанная физическая модель управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей позволяет проводить исследования влияния конструктивных (зазора, шероховатости контактирующих с МЖ поверхностей Ra, магнитов и МЖ) и режимных параметров (частоты вращения вала  $n$ , перепада давлений  $\Delta p$ , внешней температуры МЖ) на показатели МЖГ - момент трения  $M_{тр}$  и нагрев МЖ  $T_{мж}$ .

3. Экспериментально установлено, что за время 30 минут  $T_{мж}$  может повыситься на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При повышении  $n$  с 556 до 2897 об/мин – т.е. в 5,21 раза,  $T_{мж}$  повышается до 2 раз (с 33-38 до 67-78  $^{\circ}\text{C}$ ),  $M_{тр}$  повышается в 1,85-2,2 раза. При повышении  $T_{мж}$  на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$   $M_{тр}$  снижается до 3 раз. Увеличение Ra с 0,357 до 7,21 мкм повышает  $T_{мж}$  до 20 %,  $M_{тр}$  до 55 %.

4. Экспериментально подтверждена возможность регулирования критического удерживаемого перепада давлений МЖГ в диапазоне до (-20 до +20) % для разных частот вращения путем управления током регулирующей обмотки

5. Методами планирования эксперимента сформированы линейные математические модели влияния вязкости МЖ  $\eta$ ,  $n$  и Ra на  $M_{тр}$  и  $T_{мж}$ . Установлено, что  $\eta$  оказывает влияние на  $M_{тр}$  в 1,32 раза сильнее, чем  $n$ , и в 2,32 сильнее, чем Ra. Оценена корректность математических моделей, в плановых точках расхождение расчетных данных с опытными результатами не превышают 7 %. Сформирована функциональная зависимость  $\Delta p_{v.кр.МЖГ} = f(I_p, n)$  для задания регулятором управляющих воздействий в системе управления МЖГ.

6. Для выходного вала взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 разработан, изготовлен и испытан в условиях завода АО “ЭЛДИН” усовершенствованный МЖГ, заправленный производимой в ИГЭУ магнитной жидкостью. Испытания МЖГ продемонстрировали повышенную надежность герметизации и сниженный момент трения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение эффективности герметизации и безопасной эксплуатации электродвигателей, работающих в особых условиях, с изменяемым режимом работы, при разнообразных внешних воздействиях возможно путем применения магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) валов, обеспечивающих снижение техногенного риска уплотнительной системы в 4-7 раз. Актуально исследование работы МЖГ в регулируемых электродвигателях при изменении воздействующего перепада давлений, частоты вращения вала, внешней температуры.

2. Разработана управляемая электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей с изменением свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий, условий и режимов работы с обоснованием структуры элементов, схемы функционирования, системных связей элементов. Предложены конструкции управляемых МЖГ, обеспечивающих повышенную эффективность герметизации вращающихся валов.

3. Выбранный способ и средства управления, условия регулирования, разработанная модель и схема управления обеспечивают требуемое изменение свойств электротехнической системы при изменении режима и условий работы регулируемых электродвигателей. Разработанные имитационные модели электротехнической системы позволяют моделировать работу системы при изменении частоты вращения, воздействующего перепада давлений, внешней температуры. Предложенные алгоритм и программа управления электротехнической системой позволяют автоматизировать управление свойствами системы.

4. Установлено, что изменением величины и направления тока регулирующей обмотки, для модели МЖГ с комбинированным магнитоэлектрическим возбуждением, можно регулировать индукцию в зазоре в 8,17 раза, что изменяет критический удерживаемый перепад давлений, момент трения и нагрев МЖГ.

5. Показано, что анализ свойств системы при существенном различии в зонах МЖ скоростей сдвига слоев, индукций, концентраций магнитных частиц, намагниченностей и вязкостей должен включать уточненный расчет структур-

ных составляющих перепада давлений и момента трения, нахождение критического положения и формы МЖ, определение распределения поля скоростей течения МЖ, расчет мощности потерь, моментов трения и нагревов, учет шероховатости поверхностей МЖГ, контактирующих с МЖ, на множестве зон МЖ.

6. Выполнено уточненное моделирование компонентов и расчетное исследование свойств системы. Электромагнитные процессы в электродвигателе посредством воздействия вращающегося магнитного потока торцевого рассеяния лобовых частей обмоток Фб оказывают влияние на магнитное поле и работу МЖГ. При чугунном подшипниковом щите Фб, проникающий в МЖГ, в 1,8 раза больше, чем при алюминиевом щите. При стальном щите, применяемом для повышения прочности корпуса в взрывозащищенных электродвигателях, Фб возрастет еще на 2,36 %. Фб усиливает индукцию в зазоре МЖГ с постоянным магнитом под одной полюсной приставкой и ослабляет ее под другой до 14 %, что снижает критический удерживаемый перепад давлений МЖГ до 4,5 %.

7. Установлено, что вязкость МЖ  $\eta$  оказывает влияние на момент трения  $M_{тр}$  в 2,9 раз сильнее, чем частота вращения  $n$  и в 2,32 сильнее, чем возрастание шероховатости поверхности  $R_a$ ; повышение  $n$  увеличивает температуру МЖ  $T_{мж}$  в 3,1 раза сильнее, чем  $\eta$  и в 1,33 раза сильнее возрастания времени работы  $t$ . За время работы 30 минут  $T_{мж}$  может повыситься до 50 °С. При повышении  $n$  в 5,21 раза  $T_{мж}$  повышается до 2 раз,  $M_{тр}$  повышается до 2,2 раз. При повышении  $T_{мж}$  на 50 °С  $M_{тр}$  снижается до 3 раз. Увеличение  $R_a$  с 0,357 до 7,21 мкм повышает  $T_{мж}$  на 20 %,  $M_{тр}$  до 55 %. Различие температур по зонам МЖ может достигать 60 °С. С ростом  $T_{мж}$  удерживаемый перепад давлений  $\Delta p_{v,кр.мжг}$  снижается с интенсивностью до -0,35 %/°С. При изменении тока регулирующей обмотки  $I_p$  от -3 А до +4 А  $\Delta p_{v,кр.мжг}$  диапазон регулирования  $\Delta p_{v,кр.мжг}$  для разных  $n$  может достигать (-20 ÷ +20) %.

8. Методами планирования вычислительного и физического эксперимента проанализированы нелинейные взаимные связи в системе. Сформированные математические модели системных связей системы в виде полиномов могут реализовываться в качестве задающих функций регуляторов в системе.



9. Предложены способы совершенствования МЖГ валов электродвигателей, обеспечивающие снижение момента трения, повышение износостойкости поверхности и межремонтного срока работы вала, ресурса и надежности МЖГ.

10. Разработана физическая модель управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, позволяющая проводить экспериментальные исследования влияния конструктивных (зазора, шероховатости поверхностей, применяемых магнитов и МЖ) и режимных параметров (частоты вращения вала, воздействующего перепада давлений, внешней температуры) на момент трения и нагрев МЖ. Расхождения расчетных данных с опытными результатами не превышают 7 %.

11. Для взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 АО “ЭЛДИН” разработан и изготовлен усовершенствованный МЖГ вала с производимой в ИГЭУ МЖ. Испытания МЖГ продемонстрировали повышенную эффективность герметизации и сниженный момент трения в электродвигателе, работающего в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Таким образом, на основе разработки, анализа и применения электротехнической системы с управляемым магнитожидкостным герметизатором достигнуто повышение эффективности герметизации регулируемых электродвигателей путем изменения свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы, т.е. цель диссертации достигнута.

Полученные в диссертации результаты целесообразны к дальнейшему использованию в организациях, занимающихся разработкой и применением систем герметизации специальных регулируемых электродвигателей, в учебном процессе ВУЗов. Направления дальнейших исследований связаны с расширением применимости управляемых электротехнических систем магнитожидкостной герметизации валов, уточненным моделированием компонентов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абакумов, А.М. Исследование эффективности активной системы виброзащиты с магнитореологическим демпфером / А.М. Абакумов, Д.Г. Рандин // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2016. № 6. С. 68-71.
2. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
3. А.С. 1709151 (СССР). Магнитожидкостное уплотнение / Д.В. Орлов, С.А. Красульников, А.Г. Николаев. - Оpubл. в Б.И., 1992, № 4.
4. А.С. 544808 (СССР). Уплотнение вала / Г.Д. Шульман, В.В. Тихомиров. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 4.
5. Баштовой, В.Г. Введение в термомеханику магнитных жидкостей / В.Г. Баштовой, Б.М. Берковский, А.Н. Вислович. – М.: ИВТАН, 1985. – 188 с.
6. Баштовой, В.Г. Экспериментальное исследование магнитожидкостного уплотнения / В.Г. Баштовой, А.М. Альгадал, В.Б. Самойлов // Вестник БНТУ - Минск, 2006, №4. - С.51-53.
7. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости / Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков – М.: Химия, 1989. – 279 с.
8. Беспалов, В.Я. Электрические машины: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2010. – 320 с.
9. Блум, Э.Я. Магнитные жидкости / Э.Я. Блум, М.М. Майоров, О.А. Цеберс. - Рига: Знатне, 1989. – 386 с.
10. Брынский, Е.А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е.А. Брынский, Я.Б. Данилевич, В.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
11. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 288 с.
12. Бутырин, П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента. Компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / П.А. Бутырин, Т.А. Выськовская, В.В. Каратаев С.В. Материкин. - Изд-во: ДМК пресс. – 2010. 264 с.

13. Власов, А.М. Влияние конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов валов электродвигателей / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев // Вестник ИГЭУ - Вып. 5, 2019. - С.40-47.

14. Власов, А.М. Исследование изменения температуры в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов с применением программы ANSYS / А.М. Власов, В.А. Полетаев // Инженерный журнал: Наука и инновации. - 2015. №8(44). С. 5-7.

15. Власов, А.М. Исследование магнитожидкостного герметизатора с помощью полного факторного эксперимента / А.М. Власов, В.А. Полетаев // «Надежность и долговечность машин и механизмов»: IX Всеросс. научн.-практ. конф. – Иваново, 2018. - С. 46-48.

16. Власов, А.М. Применение программы ANSYS при исследовании трибологических характеристик магнитожидкостных герметизаторов / А.М. Власов, В.А. Полетаев // Физика, химия и механика трибосистем. – 2015, № 12. - С. 92-96.

17. Власов, А.М. Расчет моментов трения в магнитожидкостных устройствах при гидродинамической (жидкостной) смазке / А.М. Власов, В.А. Полетаев // Межд. научн.-техн. конф.: «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». - Иваново: ИГЭУ, 2015. - С. 288-290.

18. Власов, А.М. Система регулируемой магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев // В сб.: 19 Межд. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Иваново, 2020. - С. 244-249.

19. Власов, А.М. Электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков. // Межд. научн.-техн. конф.: «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». – Иваново: ИГЭУ, 2019. – Т. 3. Электротехника. - С. 197-200.

20. Вольдек, А.И. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин / А.И. Вольдек, Я.Б. Данилевич, В.И. Косачевский, В.И. Яковлев. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
21. Геча, В.Я. Линейный двигатель-маховик с магнитной смазкой / В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, Н.А. Белокурова, А.К. Надкин // Электротехника - № 10, 2018. – С. 72-75.
22. Гольдберг, О.Д. Надёжность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.
23. Казаков, Ю.Б. Анализ свойств и уточненное определение характеристик электромеханических магнитореологических демпферов/ Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров, В.А. Филиппов// Электротехника - 2021, №10.- С.37-43.
24. Казаков, Ю.Б. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов; под ред. Ю.Б. Казаков. — Иваново: ИГЭУ, 2010. - 184 с.
25. Казаков, Ю.Б. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелыкалов – Иваново: ИГЭУ, 2001. - 100 с.
26. Казаков, Ю.Б. Определение момента трения магнитожидкостного герметизатора с неоднородным магнитным полем на основе численного моделирования движения магнитореологической жидкости / Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова // Вестник ИГЭУ. - № 4, 2010. – С. 51-55.
27. Казаков, Ю.Б. Расширение применимости магнитожидкостных уплотнений для герметизации валов регулируемых электродвигателей / Ю.Б. Казаков, С.А. Нестеров, А.М. Власов // Сб.: «VII Международная Ставропольская конференция по магнитным коллоидам» – Ставрополь: СКФУ, 2021. - С. 188-192.
28. Казаков, Ю.Б. Уточненный электромагнитный анализ магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов/ Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов, С.А. Нестеров // Вопросы электротехнологии - №3, 2021.- С.15-26.
29. Казаков, Ю.Б. Учет перераспределения ферромагнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора

/ Ю.Б. Казаков, М.С. Сайкин, Ю.Я. Щелькалов // Электротехника - №12, 2003. - С.20 - 24.

30. Казаков, Ю.Б. Частотно-регулируемые электродвигатели с магнитожидкостной герметизацией выходного вала / Ю.Б. Казаков, А.М. Власов // XVIII Междун. конф. «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ-2020)» – Изд.: Знак, 2020. - С. 95-100.

31. Казаков, Ю.Б. Численное моделирование распределения скоростей течений нелинейной нанодисперсной магнитной жидкости в зазоре герметизатора с неоднородным магнитным полем / Вестник ИГЭУ. - 2008. - №3. - С. 25-27.

32. Казаков, Ю.Б. Численное определение положения магнитной жидкости в магнитожидкостном герметизаторе // Электротехника – 2002. - №1. - С. 51-55.

33. Казаков, Ю.Б. Численный анализ взаимовлияющих магнитного и теплового полей в магнитожидкостном герметизаторе / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелькалов // Электротехника. – 2002. - N .6 - С. 57-61.

34. Казаков, Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при режимных и конструктивных вариациях: учебное пособие для вузов / Ю.Б. Казаков. – М: Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 с.

35. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

36. Котеленец, Н.Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.

37. Краков, М.С. Влияние неоднородного нагрева на стабильность параметров и ресурс магнитожидкостных уплотнений: численное моделирование / М.С. Краков, И.В. Никифоров // Сб.: «16 Междун. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям». - Иваново: ООО «Прес-Сто», 2014.- С.329-334.

38. Краков, М.С. Влияние меридионального течения и термомагнитной конвекции на характеристики магнитожидкостного уплотнения / М.С. Краков, И.В. Никифоров // Журнал технической физики - 2011. Т. 81. № 12. - С. 47-55.

39. Кущенко, С.Н. Феррожидкостная система охлаждения взрывозащищенных тяговых двигателей / С.Н. Кущенко, Э.В. Белопухов // Тез. докл. V Всесоюз.

конф. по магнитным жидкостям. Т.1. – М.: МГУ, 1988. – С. 156 – 157.

40. Маслов, П.П. Магнитожидкостные уплотнения. К выбору зазора // Инновации в науке - № 5 (93), 2019. – С. 25-35.

41. Михалев, Ю.О. Методы исследований и испытаний магнитожидкостных электромеханических устройств. – Иваново: ИГЭУ, 2001. – 124 с.

42. Морозов, Н.А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. - Иваново: ИГЭУ, 2011. - 264 с.

43. Нестеров, С.А. Анализ процессов в магнитожидкостном герметизаторе с учётом деформации магнитной жидкости / С.А. Нестеров, И.С. Егоров // Вестник ИГЭУ – №1, 2022. - С. 54-63.

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

45. Патент на изобретение RU 2226241 С2 МПК F16C33/72. Взрывонепроницаемое уплотнение подшипникового узла / Ю.В. Афанасьев, Ф.Р. Исмагилов, Д.Ю. Пашали, Д.Н. Денисенко // Патентообладатель УГАТУ.- Оpubл. 27.03.2004.

46. Патент на изобретение RU 224275. Взрывонепроницаемое уплотнение подшипникового узла электродвигателя / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Ю.В. Афанасьев, Д.Ю. Пашали, А.Р. Набиуллин // УГАТУ. – Оpubл. 10.12.2004.

47. Патент на изобретение RU 2314623. Уплотнение вала электрической машины / Р.В. Калякулин, Ю.В. Афанасьев // УГАТУ – Оpubл. 10.01.2008.

48. Патент на изобретение RU 2658061. Маховик с магнитной смазкой (Варианты) / Н.А. Белокурова, В.Я. Геча, А.Б. Захаренко – Оpubл. 19.06.2018.

49. Патент на изобретение RU №2721400. Магнитожидкостное уплотнение вала электродвигателя / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев. - Оpubл. в Б.И. №14 от 19.05.2020.

50. Патент на изобретение RU № 2721967. Способ повышения ресурса и надежности магнитожидкостных герметизаторов / В.А. Полетаев, Ю.Б. Казаков, И.И. Ведерникова, А.М. Власов. - Оpubл. 25.05.2020 Бюл. № 15.

51. Патент на изобретение RU № 2725399. Магнитожидкостное уплотнение

вала с пониженным моментом трения / В.А. Полетаев, Ю.Б. Казаков, И.И. Ведерникова, А.М. Власов. - Оубл. 02.07.2020. Бюл. № 19.

52. Полетаев, В.А. Исследование влияния качества поверхности магнитных полюсов на момент трения магнитожидкостных герметизаторов // В.А. Полетаев, С.М. Перминов, Т.А. Пахолкова, А.М. Власов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2014. № 9. С. 38-43.

53. Полетаев, В.А. Исследование влияния формы концентратора магнитного поля на рабочие характеристики магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, А.М. Власов // Вестник БГТУ – 2018. №3 (64). - С. 23-28.

54. Полетаев, В.А. Исследование магнитного поля в рабочем зазоре магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, А.М. Власов, Т.А. Пахолкова // Международный научно-исследовательский журнал - 2019. №2 (80).- С.53-58.

55. Полетаев, В.А. Моделирование поверхностей трения рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, А.М. Власов // Трение и смазка в машинах и механизмах - 2015. № 5. С. 27-30.

56. Полетаев, В.А. Повышение эффективности работы системы магнитожидкостной герметизации валов электродвигателя / В.А. Полетаев, И.И. Ведерникова, Ю.Б. Казаков, А.М. Власов // В сб.: «19 Межд. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям». - Иваново, 2020. - С. 250-255.

57. Полетаев, В.А. Установка для исследования влияния рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств / В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова, А.М. Власов // Трение и смазка в машинах и механизмах - 2013. №9. С.27-31.

58. Полетаев, В.А. Установка для исследования эксплуатационных характеристик магнитожидкостных герметизаторов / В.А. Полетаев, А.М. Власов, Т.А. Пахолкова // Вестник УГАТУ. - 2017. Т. 21. № 2 (76). С. 17-23.

59. Попов, В.И. Современные асинхронные машины: Новая Российская серия RA / В.И. Попов, Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров – М.: «Знак», 1999. – 256 с.

60. Радионов, А.В. Влияние режимов работы асинхронных электродвигателей на их работоспособность // Вісник Сумського національного аграрного університету - № 10/1 (29), 2016. - С. 156-160.

61. Радионов, А.В. Магнитожидкостные герметизаторы для подшипниковых узлов электродвигателей шахтных комбайнов / А.В. Радионов, А.Н. Виноградов, А.В. Казакуца, О.В. Соловей, А.А. Гасюк // В сб.: «14 Межд. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям» - Иваново: ООО «Прес-Сто», 2010. - С. 354-360.

62. Радионов, А.В. Магнитожидкостные герметизаторы подшипниковых узлов электродвигателей ВАО / А.В. Радионов, А.Н. Виноградов, А.В. Казакуца // В сб.: «16 междун. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям». - Иваново: ООО «Прес-Сто», 2014. - С. 335-339.

63. Радионов, А.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании магнитожидкостных герметизаторов и частотных преобразователей в процессах эксплуатации электродвигателей серии ВАСО / А.В. Радионов, Е.В. Харламова // Екологічна безпека - № 2/2016 (22). – С. 9-14.

64. Сайкин, М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 136 с.

65. Саушев, А.В. Планирование эксперимента в электротехнике: учебное пособие - СПб: ФБОУ ВПО СПГУВК, 2012. - 273 с.

66. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020667630 «Программа управления магнитожидкостной герметизацией валов частотно-регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления» / А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, С.А. Нестеров // ИГЭУ - Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 25.12.2020 г. Бюл. № 1.

67. Сизов, А.П. Разработка конструкции комбинированного магнитожидкостного уплотнения для подшипниковых узлов текстильных машин /А.П. Сизов, А.В. Топоров, Д.Ю. Палин, Е.А. Топорова // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности – 2019, №6. – С. 208-212.

68. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин, Б.Л. Алиевский, Н.В. Синева. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - Кн.1 – 320 с.; Кн.2 -368 с.

69. Страдомский, Ю.И. Основы феррогидродинамики. – Иваново: ИГЭУ,



2004. – 108 с.

70. Тихонов, А.И. Модель вязкого трения в магнитожидкостном герметизаторе на основе метода Монте-Карло / А.И. Тихонов, Ю.Б. Казаков, К.М. Пирогов, А.С. Мартынов // Вестник ИГЭУ. - № 2, 2012. – С. 44-47.

71. Тихонов, А.И. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / А.И. Тихонов, Ю.Б. Казаков – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 80 с.

72. Топоров, А.В. Выбор наиболее рациональной конструкции магнитной системы комбинированного магнитожидкостного уплотнения / А.В. Топоров, В.В. Киселев, П.В. Пучков // Пожарная и аварийная безопасность. - 2017. № 3 (6). С. 45-60.

73. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.

74. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости. - Мн.: Выш. шк., 1988. - 184 с.

75. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink – Москва: ДМК Пресс, 2013. – 288 с.

76. Шец, С.П. Повышение герметизирующей способности манжет комбинированием с магнитожидкостным уплотнением // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2007. № 2(14). – С. 27-31.

77. Электрические аппараты: учебник и практикум / Курбатов П.А., Акимов Е.Г., Годжелло А.Г., Райнин В.Е., Лепанов М.Г., Розанов Ю.К. Под ред. П.А. Курбатова. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 250 с.

78. Chen, Y. Numerical Analysis and Experimental Study on Magnetic Fluid Reciprocating Seals / Y. Chen, Li D., Z. Li, Y. Zhang, C. He // IEEE Transactions on Magnetics - Vol. 55, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2019, Art no. 4600106.

79. Chen, Y. The Influence of the Temperature Rise on the Sealing Performance of the Rotating Magnetic Fluid Seal / Y. Chen, D. Li, Y. Zhang, Z. Li, H. Zhou // IEEE Transactions on Magnetics - Vol. 56, no. 11, pp. 1-10, Nov. 2020, Art no. 4600510

80. COMSOL CFD Module User's Guide. Available at: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>.

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

82. Hao F., Yang X., Sun P. Design of Magnetic Circuit and Simulation of Magnetic Fluid Sealing with Three Magnetic Sources // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering - 2020, Vol. 740, 012003.

83. Horak, W. Experimental and Numerical Determination of the Static Critical Pressure in Ferrofluid Seals / W. Horak, M. Szczęch // Journal of Physics: Conference Series - 2013, vol. 412, 012055.

84. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.4. - С.-Петербург, ПК TOP, 2007. - 297с.

85. Kazakov, Y.B. Interacting analyze magnetic and thermal fields in magnetic-liquid sealing unit / Y.B. Kazakov, Y.Y. Shchelykalov // Russian Electrical Engineering. – 2002, v. 73, № 6, pp. 67-73.

86. Kazakov, Yu.B. Redistribution of ferromagnetic particles in magnetic fluid within the magnetic field of a sealing unit / Yu.B. Kazakov, M.S. Saikin, Yu.Ya. Shchelykalov // Russian Electrical Engineering. – 2003, v. 74, № 12, pp. 27-32.

87. Kazakov, Yu. Research of the Applicability of Magneto-Liquid Sealing of the Shaft of Regulated Electric Motors / Y. Kazakov, S. Nesterov, Y. Stradomskii, E. Shumilov // Proc. 2021 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems. USATU, Ufa, Russia - IEEE Catalog Number: CFP21S88-ART. – Pp. 380-384.

88. Krakov, M.S. Effect of diffusion of magnetic particles on the parameters of the magnetic fluid seal / M.S. Krakov, I.V. Nikiforov // Magnetohydrodynamics - 2014, v. 50, №1, pp. 35-44.

89. Krakov, M.S. Influence of the shaft rotation on the stability of magnetic fluid shaft seal characteristics / M.S. Krakov, I.V. Nikiforov // Magnetohydrodynamics - 2008, vol. 44 (4), pp. 401-408.

90. Krakov, M.S. Regarding the influence of heating and the solet effect on a

magnetic fluid seal / M.S. Krakov, I.V. Nikiforov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2017. Vol. 431. Pp. 255-261.

91. Lampaert, S. Magnetic Fluid Bearings and Seals Methods, Design and Application: PhD thesis / Delft University of Technology, Netherlands. - 2020. - 72 p.

92. D. Li. Study on the Magnetic Fluid Sealing for Dry Roots Pump / D. Li, H. Xu, X. He, H. Lan // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2005, vol. 289, pp. 419-422.

93. Li, S. Numerical Analysis of Magnetic Grease Seal Pole Teeth Optimization Based on Pressure Bearing Capacity / S. Li, R. Zheng, Q. Zhang, D. Li // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering - 2021, vol. 1081, 012002.

94. Meng, Z. An Analysis on the Magnetic Fluid Seal Capacity / Z. Meng, Z. Jibin, H. Jianhui // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2006, vol. 303, pp. 428-431.

95. Ming, C. Coaxial Twin-shaft Magnetic Fluid Seals Applied in Vacuum Wafer-Handling Robot Chinese / C. Ming, W. Haiying, D. Yu, D. Penglei // Journal of mechanical engineering - 2012, vol. 25, no. 4, pp. 706-714.

96. Mitamura, Y. A Magnetic Fluid Seal for Rotary Blood Pumps Behaviors of Magnetic Fluids in a Magnetic Fluid Seal with a Shield / Y. Mitamura, T. Yano, W. Nakamura, E. Okamoto // Magnetohydrodynamics - 2013, vol.49, № 3-4, pp. 525-529.

97. Nesterov, S.A. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Staler / S.A. Nesterov, Yu.I. Stradomskii, V.S. Belov // Problemele energeticii regionale. – 2021. - Vol. 3(51). - Pp. 1-9.

98. Parmar, S. Two Stage Magnetic Fluid Vacuum Seal for Variable Radial Clearance / S. Parmar, V. Ramani, R.V. Upadhyay, K. Parekh // Vacuum - 2020, vol. 172, 109087.

99. Poletaev, V.A. Installazione di ricerca coppia di attrito dei dispositivi fluido magnetico / V.A. Poletaev, T.A. Pakholkova, A.M. Vlasov // Italian Science Review. - 2014. № 4 (13). - C. 456-460.

100. Poletaev, V.A. Study of the influence of the magnetic field and the value of the working gap at the moment of friction of magnetic liquid devices / V.A. Poletaev,

A.M. Vlasov, T.A. Pakholkova // Journal of Advanced Research in Technical Science. - 2019. № 13. - Pp. 5-12.

101. Potma, O. Method for Transport of Ferrofluid in a Liquid Contactless Rotational Seal / O. Potma, S. Lampaert, R. Ostayen // Sealing Technology - 2018, vol. 10, pp. 7-8.

102. Radionov, A. Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft / A. Radionov, A. Podoltsev, Zahorulkoc // Procedia Engineering - Vol. 39 (2012), pp. 327-338.

103. Radionov, A. The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes / A. Radionov, G. Podoltsev, Peczkis // Open Eng. - Vol. 8 (2018), pp. 539-544.

104. Szczęch, M. Numerical Simulation and Experimental Validation of the Critical Pressure Value in Ferromagnetic Fluid Seals / M. Szczęch, W. Horak // IEEE Transactions on Magnetics - Vol. 53, No. 7, July 2017. 4600605.

105. Szczęch, M. Experimental Study on the Pressure Distribution Mechanism Among Stages of the Magnetic Fluid Seal // IEEE Transactions on Magnetics - VOL. 54, № 6, June 2018. 4600507.

106. Zhang, H. Analysis of Split Magnetic Fluid Plane Sealing Performance / H. Zhang, D. Li // Journal of Magnetics - 2017, vol. 22(1), pp. 133-140.

107. Zhang, Y. Experimental Validation and Numerical Simulation of Static Pressure in Multi-Stage Ferrofluid Seals / Y. Zhang, Y. Chen, D. Li, Z. Yang, Y. Yang // IEEE Transactions on Magnetics - Vol. 55, № 3, March 2019, pp. 1-8, Art 4600308.

108. Zoua, J. Numerical Analysis on the Action of Centrifuge Force in Magnetic Fluid Rotating Shaft Seals / J. Zoua, X. Lib, Y. Lua, J. Hu // Journal of Magnetism and Magnetic Materials - 2002, vol. 252, pp.321323.

109. Vlasov, A. Research of Magnetic-Liquid Shaft Sealers of Electric Motors / A. Vlasov, V. Poletaev // Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020, Chelyabinsk, Russia - Publisher: IEEE Xplore: 07 October 2020, pp. 63-69. 20034028.

110. Wang, H. Computational Fluid Dynamics Study of Magnetic Liquid Rotary

Seal for Sealing Liquid // Journal of Physics: Conf. Series - 2020, vol. 1699, 012017.

111. Urreta, H. Seals Based on Magnetic Fluids for High Precision Spindles of Machine Tools / H. Urreta, G. Aguirre, P. Kuzhir, L. Norberto, L. Lacalle // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Korean Society of Precision Engineering - 2018, Vol. 19(4), pp. 495-503.

112. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [zkem.com.ua](http://zkem.com.ua) / АО «Завод крупных электрических машин». (Дата обращения: 20.02.2022).

113. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [aperon.ru/node/342](http://aperon.ru/node/342) / КБ «АПЕРОН». (Дата обращения: 20.02.2022).

114. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [privod-lysva.ru](http://privod-lysva.ru) / ОАО ХК «Привод». (Дата обращения: 20.02.2022).

115. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [wind.mksat.net](http://wind.mksat.net) / ООО «ВИНД». (Дата обращения: 20.02.2022).

116. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ec-intec.ru](http://ec-intec.ru) ООО / «ИнТек Техно». (Дата обращения: 20.02.2022).

117. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [fhd.nikolaev.ua](http://fhd.nikolaev.ua) / ООО «НПВП «Феррогидродинамика». (Дата обращения: 20.02.2022).

118. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ispu.ru/node/5796](http://ispu.ru/node/5796) / ПНИЛ ПФГД ИГЭУ. (Дата обращения: 20.02.2022).

119. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [sez.ru](http://sez.ru) [ruselprom.ru](http://ruselprom.ru) / Сафоновский электромашиностроительный завод. (Дата обращения: 20.02.2022).

120. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [skf.com/ru/products/industrial-seals/power-transmission-seals](http://skf.com/ru/products/industrial-seals/power-transmission-seals) / SKF. (Дата обращения: 20.02.2022).

121. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [eldin.ru](http://eldin.ru) / Ярославский электромашиностроительный завод «ЭЛДИН». (Дата обращения: 20.02.2022).

122. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [ferrotec.com](http://ferrotec.com) / Ferrotec Corporations. (Дата обращения: 20.02.2022).



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2721400

**МАГНИТОЖИДКОСТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ ВАЛА  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

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

Авторы: *Власов Алексей Михайлович (RU), Казаков Юрий Борисович (RU), Полетаев Владимир Алексеевич (RU)*

Заявка № 2019133087

Приоритет изобретения 16 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 мая 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 октября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2725399

**Магнитожидкостное уплотнение вала с пониженным моментом трения**

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

Авторы: *Полетаев Владимир Алексеевич (RU), Казаков Юрий Борисович (RU), Ведерникова Ирина Игоревна (RU), Власов Алексей Михайлович (RU)*

Заявка № 2019133086

Приоритет изобретения 22 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 02 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 22 ноября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2721967

**Способ повышения ресурса и надежности  
магнитожидкостных герметизаторов**

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

Авторы: *Полетаев Владимир Алексеевич (RU), Казаков Юрий Борисович (RU), Ведерникова Ирина Игоревна (RU), Власов Алексей Михайлович (RU)*

Заявка № 2019114386

Приоритет изобретения 07 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 25 мая 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 мая 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020667630

**«Программа управления магнитожидкостной герметизацией валов частотно-регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления»**

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

Авторы: *Власов Алексей Михайлович (RU), Казаков Юрий Борисович (RU), Нестеров Сергей Александрович (RU)*

Заявка № 2020666888

Дата поступления 17 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 декабря 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



## Приложение 2. Акты внедрения



ОКПО 05757995, ОГРН 1027600839001  
ИНН/КПП 7606004895/760601001

Ордена Отечественной войны I степени  
АО «Ярославский электромашиностроительный завод»

Yaroslavl Electric Machine Building Plant  
«ELDIN»

150040, Россия, г. Ярославль, пр. Октября, 74  
телефон: (4852) 78-00-00, 78-01-10  
факс: (4852) 78-00-01  
e-mail: info@eldin.ru  
internet: http://www.eldin.ru

Russia, 150040, Yaroslavl, Prosp. Oktyabrya, 74  
phone: +7 (4852) 78-00-00, 78-01-91  
fax: +7 (4852) 78-00-01  
e-mail: info@eldin.ru  
internet: http://www.eldin.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора  
по научной работе - главный конструктор

 Тихонов С.И.



2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертации Власова Алексея Михайловича

Удостоверяем, что полученные в диссертационной работе Власова А.М., научный руководитель д.т.н. профессор Казаков Ю.Б., теоретические и практические результаты использованы при разработке магнитожидкостных герметизаторов для уплотнений валов специальных регулируемых электродвигателей. Разработанный, изготовленный и испытанный усовершенствованный магнитожидкостный герметизатор взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 обеспечивает повышенную надежность герметизации и сниженный момент трения.

Начальник бюро расчета электрических машин  
отдела главного конструктора, к.т.н.

Ананьев С.С.

Начальник бюро стандартизации и сертификации

Травкина И.Л.

Система менеджмента качества сертифицирована







«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ИГЭУ

Гусенков А.В.

03 2022 г.

### АКТ

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

Удостоверяем, что результаты диссертационной работы Власова Алексея Михайловича, научный руководитель д.т.н., профессор Казаков Ю.Б, полученные при исследовании управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, работающих в разных режимах и условиях, используются в материалах занятий со студентами по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электромеханика» в дисциплине «Специальные электромеханические устройства».

Исполняющий обязанности

заведующего кафедрой электромеханики, к.т.н.

Нестеров С.А.

Доцент кафедры электромеханики, к.т.н.

Морозов Н.А.