**Приходько Виктор Маркович. Основы совершенствования триботехнических характеристик тяжелонагруженных опор и подшипников скольжения : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04 : Ростов н/Д, 2004 404 c. РГБ ОД, 71:05-5/601**

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения
Министерства путей сообщения Российской Федерации»

На правах рукописи

Приходько Виктор Маркович

ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ОПОР
И ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
05.02.04 - Трение и износ в машинах
Диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор

К. С. Ахвердиев академик РАН,

доктор технических наук, профессор В. И. Колесников

Ростов-на-Дону

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 11

[Глава 1. Современное состояние вопроса и задачи исследования 27](#bookmark5)

1. Способы повышения несущей способности подшипников

скольжения 27

1. Современное состояние теории и расчета подшипников скольжения. Математические модели гидродинамической смазки

в системах с плавлением ползуна или направляющей 40

1. Современные представления теории смазки в подшипниках

скольжения с пористыми вкладышами 44

1. Современное состояние теории и расчета подшипников

скольжения, имеющих неоднородную рабочую поверхность (на примере моторно-осевых подшипников МОП) 55

[Глава 2. Математическая модель прогнозирования оптимального профиля опорной поверхности упорного и радиального подшипников с учетом сил инерции . 66](#bookmark32)

1. Разработка метода прогнозирования оптимального профиля

неподвижной части упорного подшипника с учетом нелинейных факторов 67

1. Уравнения движения и граничные условия 68
2. Автомодельное решение задачи 69
3. Выводы 70
4. Разработка метода прогнозирования оптимального профиля неподвижной части упорного подшипника с учетом нелинейных факторов и экспоненциальной зависимости вязкости от давления. 72

з

1. Математическая модель прогнозирования оптимального

профиля опорной поверхности радиального подшипника с учетом нелинейных факторов 73

1. Основные уравнения и граничные условия 74

'Ар

1. Автомодельное решение задачи 75
2. Определение несущей способности подшипника 76
3. Выводы 77
4. Нелинейные эффекты воздействия вязко-пластичной смазки

на шип радиального подшипника скольжения с оптимальным профилем опорной поверхности.... 77

1. Основные уравнения и граничные условия 79
2. Точное автомодельное решение для определения

несущей способности подшипника 79

1. Выводы 81
2. Математическая модель прогнозирования оптимального профиля опорной поверхности радиального подшипника с учетом

£ нелинейных факторов и экспоненциальной зависимости вязкости

от давления 81

1. Автомодельное решение задачи 83
2. Нелинейные эффекты воздействия вязко-пластичной смазки на шип радиального подшипника скольжения с оптимальным профилем опорной поверхности при экспоненциальной зависимости вязкости и предельного напряжения сдвига от

85

давления

1. Автомодельное решение задачи 86
2. Выводы 87
	1. Выравнивание и минимизация плотности температурного

поля рабочей поверхности упорного подшипника с учетом нелинейных факторов 87

. 4

* + 1. Постановка задачи. Основные уравнения и граничные

условия 88

* + 1. Автомодельное решение задачи 89
		2. Выводы 90

# 2.8. Разработка радиального подшипника скольжения с

температуровыравнивающим контуром поверхности 92

1. Постановка задачи. Основные уравнения и граничные

условия 92

1. Автомодельное решение задачи 94
2. Выводы 95

Глава 3. Теоретическое исследование пространственного напряженно­деформированного состояния пористого вкладыша 98

* 1. Физическая постановка задачи 98
	2. Задача о напряженном состоянии обоймы 100
	3. Задача о напряженном состоянии пористого вкладыша под

^ действием деформации обоймы 110

* 1. Напряженное состояние пористого вкладыша под действием

гидродинамического давления 117

Глава 4. Математическая модель гидродинамической смазки, образующейся при плавлении прилегающей нагруженной опорной поверхности радиального подшипника, с учетом нелинейных

факторов ^

1. Теоретическая модель гидродинамической смазки, полученной расплавом опорной поверхности радиального подшипника, без учета сил инерции 121
2. Уравнения движения и граничные условия 122
3. Асимптотическое решение задачи 124
4. Определение несущей способности подшипника 126
5. Теоретическая модель гидродинамической смазки,

полученная расплавом нагруженной опорной поверхности радиального подшипника, с учетом сил инерции 126

^ 4.2.1. Уравнения движения и граничные условия 127

1. Автомодельное решение задачи 127
2. Определение несущей способности подшипника 130
3. Выводы 130
	1. Математическая модель гидродинамической смазки, образующейся при плавлении прилегающей нагруженной опорной поверхности радиального подшипника, без учета нелинейных факторов и при экспоненциальной зависимости

131

вязкости от давления

* + 1. Уравнения движения и граничные условия 131
		2. Автомодельное решение задачи 132
		3. Определение поддерживающей силы 134

*ф* 4.3.4. Выводы 134

* 1. Математическая модель гидродинамической смазки, образующейся при плавлении прилегающей опорной поверхности

радиального подшипника, с учетом сил инерции, при

- 135

экспоненциальной зависимости вязкости от давления

* + 1. Автомодельное решение задачи 135
		2. Определение несущей способности подшипника 137
	1. Разработка теоретической модели вязкопластичной смазки,

полученной расплавом опорной поверхности подшипника, без учета сил инерции 137

* 1. Математическая модель вязкопластичной смазки, полученной

расплавом опорной поверхности радиального подшипника, с учетом сил инерции 140

* 1. Разработка нестационарной теоретической модели систем, состоящих из ползуна и направляющей, смазываемых расплавом .. 146
		1. Основные уравнения и граничные условия 147
		2. Решение стационарной задачи 149
		3. Решение нестационарной задачи 153

Глава 5. Гидродинамический расчет упорных и радиальных подшипников, имеющих неоднородную рабочую поверхность 159

1. Автомодельное течение смазки между двумя наклоненными

друг к другу пластинами, одна из которых содержит тонкий полимерный слой 159

1. Автомодельное течение смазки в радиальном подшипнике

бесконечной длины при наличии на рабочей поверхности вкладыша тонкого полимерного слоя 161

1. Математическая модель упорного подшипника скольжения,

содержащего на рабочей поверхности полимерные зоны 164

1. Математическая модель радиального гидродинамического

подшипника скольжения, имеющего составную металло­полимерную структуру рабочей поверхности 169

1. Математическая модель упорного подшипника скольжения,

содержащего на опорной поверхности полимерные пробки 174

1. Математическая модель радиального подшипника при

наличии на рабочей поверхности микропористых полимерных пробок 177

1. Основные характеристики упорного подшипника,

содержащего на рабочей поверхности микропористые полимерные пробки 180

1. Аналитические зависимости для основных характеристик

радиального подшипника 183

1. Результаты численного анализа найденных аналитических выражений для основных характеристик упорного и радиального

подшипников, содержащих на рабочей поверхности микропористые полимерные пробки 185

1. Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения со ступенчатой рабочей поверхностью (на примере

безбаббитового моторно-осевого подшипника (МОП)) 189

1. Гидродинамический расчет радиального подшипника со

ступенчатой поверхностью, содержащей микропористые полимерные составляющие (на примере МОП) 193

1. Влияние нелинейных факторов на несущую способность

подшипника скольжения со ступенчатой поверхностью, содержащей микропористые полимерные составляющие (на примере МОП) 196

Глава 6. Расчет сферических подшипников с принудительной подачей

смазки, работающих в нестационарном режиме 199

1. Движение вязкой жидкости между двумя концентрическими

сферами с источником и стоком 199

1. Движение несжимаемой вязкой жидкости в концентрическом

сферическом подшипнике с источником и стоком 211

1. Движение вязкой жидкости между двумя вращающимися

сферами 220

Глава 7. Об устойчивости радиального подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности и пористого подшипника конечной

длины с принудительной подачей смазки 229

1. Об устойчивости радиального подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности 229
2. Постановка задачи 229
3. Уравнения движения и граничные условия 230
4. Численное интегрирование уравнения движения

шипа 232

1. Выводы 233
2. Об устойчивости пористых радиальных подшипников конечной длины, работающих с принудительной подачей смазки... 235
3. Постановка задачи 235
4. Основные уравнения и граничные условия 236
5. Определение гидродинамического давления в

пористом слое и в смазочной пленке 239

1. Выводы 241

Глава 8. Новые технические решения полученные с использованием

приведенных теоретических исследований 245

[*щ,* 8.1. Подшипник скольжения 245](#bookmark415)

1. Моторно-осевой подшипник (вариант 1) 247
2. Моторно-осевой подшипник (вариант 2) 250
3. [Моторно-осевой подшипник (вариант 3) 254](#bookmark423)
4. [Моторно-осевой подшипник (вариант 4) 256](#bookmark418)
5. [Пористый подшипник (вариант 1) 261](#bookmark417)
6. [Пористый подшипник (вариант 2) 264](#bookmark416)
7. Шарнир 269
8. [Упорный подшипник скольжения 271](#bookmark429)
9. [Упорный подшипник, смазываемый расплавом 276](#bookmark437)
10. [Упорный подшипник скольжения с температуро­выравнивающим контуром поверхности ползуна 281](#bookmark454)

*Щ*

1. Радиальный подшипник скольжения с квазикруговым

контуром опорной поверхности 285

1. [Радиальный подшипник скольжения с температуро­выравнивающим контуром поверхности 289](#bookmark60)
2. Способы получения композиционных слоев с различной

температурной устойчивостью на рабочей поверхности вала 293

1. [Упорный подшипник скольжения двойного действия 300](#bookmark456)

Глава 9. Экспериментальная оценка основных теоретических результатов 305

1. Цель эксперимента 305
2. Методика проведения эксперимента 307
3. Измерение момента сил трения 307
4. [Определение режима трения 308](#bookmark462)
5. Измерение толщины смазочной пленки 311
6. Измерение температур 313
7. [Экспериментальные подшипники и стенды для испытания 317](#bookmark465)
8. [Анализ результатов эксперимента 333](#bookmark466)
9. Экспериментальное исследование работы пористых

подшипников с многослойным пористым вкладышем и шипом с пористым двухслойным слоем на рабочей поверхности 334

1. Оборудование для испытания 335
2. Обоснование объема испытаний, методика и обработка

результатов испытаний 339

1. Методика измерения толщины смазочного слоя 342
2. Разработка методики измерения температуры..! 345
3. Анализ результатов эксперимента 346
4. Технология по плакированию трущихся поверхностей подшипников скольжения сверхпластичными сплавами,

обладающими низкой температурой плавления 355

1. Результаты экспериментальных исследований упорных подшипников, работающих на принудительной смазке, полученной расплавом 357
2. Экспериментальное исследование работы радиальных подшипников, работающих на принудительной смазке и смазке с расплавом при наличии на рабочей поверхности вкладыша

мягкого металлического покрытия 357

1. Анализ результатов экспериментальных исследований 361
2. Результаты эксплуатационных испытаний 363
3. Результаты эксплуатационных испытаний опытных

образцов 363

1. Морфологические исследования рабочих

поверхностей безбаббитовых ступенчатых моторно-осевых подшипников 363

1. Выводы по экспериментальной оценке основных

теоретических результатов 364

Общие выводы 375

Литература 377

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития машиностроения заключаются в неизбежном росте скоростей вращающихся деталей, увеличении статических и ударных нагрузок, действующих на подшипники скольжения. Поэтому разработка подшипников, обладающих повышенной несущей способностью, работающих в устойчивом гидродинамическом и тепловом режиме, является актуальной. Анализ существующих работ в данном направлении показывает, что в этой области существует ряд нерешенных проблем. Прежде всего, это проблема, связанная с научно обоснованным выбором размеров сужающегося и расширяющегося зазоров упорного и радиального подшипников, обеспечивающих их устойчивый гидродинамический и тепловой режим работы.

Другой существенной проблемой является разработка надежной и современной конструкции подшипника, работающего в устойчивом жидкостном режиме даже в экстремальных условиях. Такой режим работы подшипника можно обеспечить применением новых моделей течения смазки с расплавом. Известно, что при скольжении одного тела по поверхности другого с большой скоростью на поверхности контакта возникает макроскопическое неустойчивое давление и температура, что вызывает деформацию номинально плоских поверхностей. Это, в свою очередь, приводит к тому, что возникает контактное давление, а в прилегающих к ним зонах наблюдается низкое давление и разделение поверхностей. В зонах повышенного давления происходит сильный фрикционный нагрев, что приводит к расплавлению прилегающей поверхности. Выполненные работы [1-4] дают лишь первое представление о процессе смазки с расплавом и не могут быть использованы для анализа работы упорных подшипников, работающих на смазке с расплавом с учетом нелинейных факторов.

Представляет значительный интерес использование смазки с расплавом в упорных и радиальных тяжелонагруженных узлах трения. Прогнозирование устойчивого режима работы указанных узлов трения также является одной из актуальных проблем современного машиностроения и составляет одну из задач исследования данной диссертационной работы.

В настоящее время одним из наиболее эффективных заменителей цветных антифрикционных материалов в подшипниках скольжения являются пористые металлокерамические сплавы.

Подшипники с пористыми вкладышами в гидродинамическом режиме работают с меньшим шумом и лучшим теплообменом. Жидкостное трение создается за счет запаса масла в порах вкладыша. Но этот запас обеспечивает надежную работу узла трения только при легких режимах нагружения и в ограниченный промежуток времени. Устойчивый жидкостный режим трения можно получить только регулярной подачей масла в зазор. Конструкции подшипниковых узлов с пористыми вкладышами позволяют осуществлять подачу масла в зазор под давлением через тело вкладыша.

Создание пористых радиальных подшипников скольжения, удовлетворяющих высоким требованиям, невозможно без дальнейшего развития гидродинамической теории смазки. Теоретические и

экспериментальные исследования пористых радиальных подшипников проводились ранее, однако они проведены либо для случая пористого подшипника бесконечной длины, либо для случая очень короткого пористого подшипника, запрессованного в непроницаемый корпус. Для подшипника конечной длины в линейной и нелинейной постановке задача решена в случае, когда вкладыш однослойный или многослойный и имеет постоянную толщину.

Разработка пористого подшипника при тяжелонагруженных режимах работы, обладающего повышенной несущей способностью, необходимой прочностью, работающего с низким коэффициентом трения, приводит к необходимости решения задачи гидродинамического расчета пористого подшипника с многослойным вкладышем переменной толщины и с шипом, содержащим двухслойный пористый слой на рабочей поверхности; контактной задачи определения деформации и напряженного состояния слоистого пористого вкладыша под действием нагрузки и гидродинамического давления. Анализ выполненных в рамках этого направления работ, показывает, что данная задача в общей постановке остается нерешенной, и потому она и включена в исследования настоящей диссертационной работы.

Следует отметить, что в последнее время все чаще используются сферические опоры с принудительной подачей смазки в зазор между плавающим элементом и опорной чашей. Интенсивный направленный поток смазки в зазоре подшипника улучшает качество смазки, способствующей увеличению несущей способности подшипника. Такие опоры нашли широкое применение в точных гироскопических приборах, работающих в условиях весьма малых динамических нагрузок, обладающих в отличие от других типов опор ничтожным моментом трения. При теоретическом использовании гидродинамики таких опор основные трудности связаны не только с нелинейностью исходных уравнений Навье-Стокса, но и необходимостью удовлетворения нелинейным граничным условиям на отверстиях, через которые в зазор подается и выводится смазка. Различные авторы [5-9] применяют несколько методов упрощения при решении этой задачи. Решение такой проблемы в общей постановке, с учетом нелинейных факторов, является одной из задач исследования данной диссертационной работы.

В настоящее время в узлах трения также находят широкое применение микропористые полимерные материалы. Эти материалы используются для создания системы, удерживающей смазку за счет действия капиллярных сил. Как известно, для большинства трибологических контактов требуется малое количество смазки. Но специалистам в области смазки не удается разработать средства распределения малого количества масла, обеспечивающего требуемую надежность в течение всего срока службы механизмов. В последнее время за рубежом (У. И. Демисон, К. Д. Нельсон) делаются попытки решения этой проблемы с применением микропористых полимерных материалов в подшипниковых узлах, в виде пробок, запрессованных на рабочую поверхность вкладыша. Запрессованные микропористые полимерные пробки не только хранят смазочный материал, но и сами, обладая смазывающими свойствами, регулируют скорость распределения смазки вблизи трибологического контакта. Одним из важнейших факторов, влияющих на работу узла трения, является состояние рабочей поверхности вкладыша.

Если структура рабочей поверхности неоднородна, это должно найти отражение в расчетной схеме для подшипникового узла. В существующих методиках расчета не учитываются различия во взаимодействии смазка - полимер и смазка - металл.

Поэтому построение математических моделей тяжелонагруженных подшипников, одними из которых являются динамически нагруженные моторно-осевые подшипники (МОП) электровозов и тепловозов, учитывающих влияние микропористых полимерных пробок на их рабочей поверхности, а также разработка ступенчатых моторно-осевых подшипников, обеспечивающих эксплуатационную надежность всего колесно-моторного блока, являются актуальной проблемой.

Решению вышеуказанных проблем посвящается данная диссертационная работа.

Работа состоит из введения и девяти глав.

Во введении содержится обоснование актуальности работы, основные научные положения, составляющие предмет диссертационной работы.

В первой главе приводится современное состояние вопроса и ставятся задачи исследования.

Во второй главе приводится математическая модель прогнозирования рационального профиля опорной поверхности упорного и радиального подшипников с учетом сил инерции.

Вначале делается попытка разработать рациональный профиль неподвижной части упорного подшипника с повышенной несущей способностью. Увеличение несущей способности достигается за счет организации течения смазки в зазоре упорного подшипника сначала в сужающейся его части, а затем в расширяющейся. В этом случае формируется поле повышенных скоростей при заданном расходе смазки, что приводит к повышению несущей способности подшипника. При этом область повышенных давлений расширяется, пик гидродинамического давления понижается, что обусловливает постоянную форму зазора. Указанный результат получен при использовании псевдокругового контура опоры. Выбору рационального профиля опорной поверхности упорного подшипника предшествовало решение следующей задачи. Рассматривается установившееся движение вязкой несжимаемой жидкости между двумя пластинами, одна их которых с псевдокруговым контуром, оптимизирующим несущую способность узла трения, неподвижна, а другая - с прямолинейным контуром, расположенная под углом а к прямолинейному контуру, движется со скоростью *и\** в сторону быстрого сужения зазора. За исходные берутся уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости для «тонкого слоя». С учетом сил инерции найдено точное автомодельное решение задачи. В результате получено аналитическое выражение для несущей способности и установлен рациональный профиль опорной поверхности упорного подшипника, обеспечивающий повышенную несущую способность подшипника.

Дана оценка влияния нелинейных факторов на несущую способность подшипника. Далее в этой главе приводится математическая модель прогнозирования рационального профиля опорной поверхности радиального подшипника с учетом нелинейных факторов и экспоненциальной

зависимости вязкости от давления. Здесь решается задача повышения несущей способности за счет увеличения объема смазки в зазоре гидродинамического давления.

Ф Указанный результат получен при использовании подшипника с

контуром опорной поверхности, отличным от кругового. В зоне высоких давлений радиус кривизны опорной поверхности стремится к радиусу кривизны шипа, а в нагруженной зоне - к радиусу кривизны кругового подшипника. Рациональному выбору профиля опорной поверхности радиального подшипника предшествовало решение следующей задачи: пространство между круговым шипом и эксцентрично расположенным вкладышем с некруговым контуром опорной поверхности, заполнен вязкой несжимаемой жидкостью. Шип вращается с угловой скоростью, а вкладыш неподвижен.

За исходные берутся система уравнений движения для «тонкого слоя» с учетом нелинейных факторов и уравнение неразрывности. Получено точное автомодельное решение задачи и получены аналитические зависимости для

\*

основных рабочих характеристик подшипника. В результате найден рациональный профиль опорной поверхности радиального подшипника, обеспечивающий в два раза повышенную несущую способность по сравнению с круговым контуром. Рассмотрены случаи вязкопластичной смазки при постоянной и экспоненциальной зависимости вязкости и предельного напряжения сдвига от давления. Дана оценка влияния параметра пластичности на основные рабочие характеристики подшипника. В заключении этой главы приводятся результаты предложенного нового метода выравнивания и минимизации плотности температурного поля рабочей поверхности упорного и радиального подшипников с учетом нелинейных факторов. Подшипники скольжения с предлагаемым профилем опорной поверхности могут быть использованы в случае необходимости для стабилизации температурного режима опор и снижения момента трения.

В третьей главе приводится решение контактной задачи взаимодействия шипа и вкладыша пористого подшипника. Исследуемая система описывается совокупностью задач определения деформации и напряженного состояния стальной обоймы под действием нагрузки; слоистого пористого вкладыша под действием гидродинамического давления; определения общего напряженного состояния слоистого пористого вкладыша под действием нагрузки и гидродинамического давления.

В четвертой главе приводятся результаты предложенной теоретической модели гидродинамической смазки, полученной расплавом опорной поверхности радиального подшипника без учета и с учетом сил инерций. Отдельно рассмотрены случаи, когда смазка, полученная расплавом, обладает ньютоновскими и вязкопластичными свойствами. Рассматривается система, состоящая из вкладыша, нагруженная опорная поверхность которой содержит металлический слой, обусловленный низкой температурой плавления; шип, имеющий высокую температуру плавления, вращается с угловой скоростью *О.* и контактирует с опорной поверхностью подшипника.

При анализе рассматриваемой системы использованы следующие допущения:

1. жидкая фаза является несжимаемой;
2. поведение пленки в случае ньютоновской жидкости описывается двумерным уравнением Навье - Стокса с учетом сил инерции, а в случае вязко­пластичной смазки - аналогом уравнения Рейнольдса, полученным из уравнения Генки - Ильюшина методом оценок;
3. плавление не сопровождается изменением объема;
4. все тепло, выделяющееся в пленке в результате вязкого сдвига, идет на плавление прилегающей поверхности.

Найдено точное автомодельное решение задачи, получено аналитическое выражение для функции, определяющей форму смазочной пленки, обусловленной расплавом, а также для основных рабочих характеристик подшипника. В результате установлено, что профиль опорной поверхности, обусловленный расплавом, одновременно обеспечивает повышенную несущую способность и аномально низкий коэффициент трения. Дана оценка влияния параметра пластичности, а также параметров, входящих в экспоненциальную зависимость вязкости и предельного напряжения сдвига от давления на основные рабочие характеристики подшипника.

В пятой главе приведены результаты гидродинамического расчета упорных и радиальных подшипников, имеющих неоднородную рабочую поверхность. С учетом условий проницаемости и смачиваемости полимера со смазкой разработаны математические модели для упорного и радиального подшипников, содержащих на рабочей поверхности полимерные зоны в виде микропористых полимерных пробок. Получены аналитические выражения для основных рабочих характеристик этих подшипников. Проведенный здесь численный анализ найденных зависимостей позволяет оценить влияние неоднородности рабочей поверхности на основные характеристики подшипника. Одной из характеристик неоднородности здесь считается отношение площадей металлической зоны и полимерной *(z)-* При *X* є (0,5 - 2,5) наблюдается зона локального минимума для безразмерного

гидродинамического давления. При 15-25% содержания полимера наблюдается резкое снижение коэффициента трения и в то же время несущая способность достаточно высока. Указанные диапазоны представляют набор оптимальных структурных значений параметров. Как и следовало ожидать, несущая способность, а также коэффициент трения существенно зависят от безразмерной скорости проскальзывания смазки по полимеру, от размеров полимерной зоны и от расположения относительно зон металла. Значительный эффект достигается, когда полимерное включение располагается в зоне, соответствующей минимальному зазору. Варьируя конструктивные параметры, можно достичь оптимального соотношения несущей способности подшипника и коэффициента трения в зависимости от условий работы узла.

В заключении этой главы решается задача гидродинамического расчета радиального подшипника скольжения со ступенчатой рабочей поверхностью. Найдено точное автомодельное решение задачи. В результате установлена оптимальная высота ступени. Рассмотрен случай, когда на ступенчатой поверхности содержатся микропористые полимерные пробки.

В шестой главе дается метод расчета сферических подшипников с принудительной подачей смазки, работающих в нестационарном режиме. Вначале рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости между двумя концентрическими сферами при наличии источника и стока. За исходные берется полная система нелинейных уравнений Навье-Стокса в сферической системе координат. Далее в этой главе решается задача о неустановившемся движении вязкой жидкости между двумя концентрическими сферами. Предполагается, что внешняя сфера неподвижна, а внутренняя совершает произвольное вращение. Надув смазки в щелевой зазор производится со скоростью, зависящей от времени, через подводящее отверстие, расположенное внизу неподвижной сферы. Движение жидкости рассматривается на основе нелинейных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Граничные условия задачи записываются через дельта-функцию. Затем дельта-функция разлагается приближенно в ряды по полиномам Лежандра.

В седьмой главе решается задача об устойчивости подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности и пористого подшипника конечной длины, работающего с принудительной подачей смазки.

Составлено уравнение движения шипа

4\*

*\ajj*

*e „* „

dT2 o)j2 /л c

<р + є

^d(p^ 

d2(p F9

dT2 со2/лс є



(p~-

**

ydTj

dg)



где *є* = относительный эксцентриситет; *е -* эксцентриситет; с-радиальный

*с*

зазор; *F£-* компонента несущей способности пленки вдоль линии центров; *F9-* компонента несущей способности по нормали к линии центров; *ц -* масса

*(sV2*

зазора; *o)g=\ — \* ; *g -* ускорение силы тяжести; *(р —* угол положения;

*Т —(Ojt -* безразмерное время; *t -* время, *C0j -* угловая скорость шипа.

Используя явный вид функций *F£* и *F9,* система уравнений движения шипа интегрируется численно. В результате установлено, что подшипник с установленным во второй главе рациональным профилем опорной поверхности *л* обладает гораздо большей устойчивостью, чем подшипник с круговым

контуром опорной поверхности. Также установлено, что при малых возмущениях начальной скорости площадь устойчивости работы подшипника больше, чем при больших возмущениях начальной скорости как для кругового, так и для подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности. Для подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности резкое увеличение площади области устойчивости наблюдается при значениях статического относительного эксцентриситета *є*0 «0,3, а для подшипника с круговым контуром при *є0* є [0,4; 0,5].

В случае возмущения начального положения резкое увеличение области устойчивости для подшипника с квазикруговым контуром опорной поверхности наблюдается при *є0* = 0,4, а для подшипника с круговым

^ контуром при значении *є0* є [0,8; 0,85]. В заключение этой главы решается

задача об устойчивости радиальных подшипников конечной длины с принудительной подачей смазки. В случае однослойного пористого подшипника, используя аналитические выражения для компонентов несущей способности, найденные в седьмой главе, система уравнений движения также интегрируется численно, а в случае подшипника с двухслойным пористым вкладышем переменной толщины с двухслойным пористым слоем на рабочей поверхности численное интегрирование уравнения движения шипа производится с использованием аналитических выражений для компонент поддерживающей силы, найденных в третьей главе. В результате установлено, что пористые подшипники обладают значительно большей устойчивостью (особенно пористые двухслойные подшипники), чем сплошные подшипники как при полном заполнении смазкой зазора, так и при частичном.

В восьмой главе приводятся результаты новых технических решений в виде авторских свидетельств и патентов на способы и конструкции, полученные с использованием проведенных автором диссертации исследований.

Эти результаты приводятся в виде десяти уже полученных свидетельств и патентов на конструкции и способы, а также в виде семи поданных заявок на изобретения (патентов).

В девятой главе дается экспериментальная оценка основным теоретическим результатам, а также приводятся результаты эксплуатационных испытаний.

В заключение делаются выводы по экспериментальной оценке основных теоретических результатов.

Цель работы. Используя новые модели течения, разработать усовершенствованные методы расчета, позволяющие теоретически раскрыть закономерности сложных тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в смазываемых тяжелонагруженных парах трения, упорных радиальных и сферических подшипников. Прогнозировать профиль опорной поверхности упорных и радиальных подшипников, обеспечивающих их повышенную несущую способность и температурную устойчивость.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод прогнозирования профиля опорной поверхности упорного и радиального подшипников скольжения, обеспечивающий одновременно повышенную несущую способность, температурную и гидродинамическую устойчивость их работы.
2. Математическая модель гидродинамической смазки, обладающей вязкими и вязкопластичными свойствами, обусловленной расплавом прилегающей опорной поверхности радиального и упорного подшипников в результате фрикционного нагрева.
3. Метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния слоистого пористого вкладыша, позволяющий проводить выбор подшипникового материала для эффективной работы тяжелонагруженных узлов трения.
4. Аналитический метод расчета сферических подшипников с принудительной подачей и отводом смазки, работающих в нестационарном режиме.
5. Математическая модель прогнозирования работы упорного и радиального подшипников, содержащих на рабочей поверхности микропористые полимерные составляющие.
6. Новые технические решения усовершенствования конструкций упорных, радиальных, сферических и моторно-осевых подшипников, обладающих повышенной несущей способностью и работающих в устойчивом тепловом и гидродинамическом режимах. Результаты экспериментальных и эксплуатационных исследований по оценке основных теоретических выводов.

Научная новизна.

1. С учетом нелинейных факторов и реологических свойств смазочных композиций разработан метод прогнозирования профиля опорной поверхности упорного и радиального подшипников скольжения, обеспечивающий одновременно повышенную несущую способность, температурную и гидродинамическую устойчивость их работы.
2. Разработана математическая модель гидродинамической смазки, обладающей вязкими и вязкопластичными свойствами, обусловленной расплавом прилегающей опорной поверхности радиального и упорного подшипников в результате фрикционного нагрева.
3. Разработан метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния слоистого пористого вкладыша, позволяющий проводить выбор

^ подшипникового материала для эффективной работы тяжелонагруженных

узлов трения.

1. Разработан метод гидродинамического расчета основных рабочих характеристик сферических подшипников, работающих в нестационарном режиме с принудительной подачей смазки.
2. Разработана математическая модель прогнозирования работы упорных и радиальных подшипников, содержащих на рабочей поверхности микропористые полимерные составляющие. Предложен критерий, характеризующий неоднородность рабочей поверхности подшипника. Найдены условия, обеспечивающие гидродинамический режим работы подшипника. Предложен научно обоснованный метод расчета ступенчатых подшипников и выбора оптимальных их функциональных параметров.

*Щ*

1. Разработаны новые технические решения по усовершенствованию работы упорных, радиальных, сферических и моторно-осевых подшипников, подтвержденные 12-ю авторскими свидетельствами и патентами. Дана экспериментальная и эксплуатационная оценка основным теоретическим результатам.

Практическая ценность. Разработана методика по прогнозированию рационального профиля опорной поверхности упорных и радиальных подшипников, а также по минимизации плотности температурного поля на рабочей поверхности этих подшипников. .

Кроме того, разработаны конструкции упорных и радиальных подшипников, обладающих повышенной несущей способностью и работающих в устойчивом тепловом режиме.

Разработан метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния слоистого пористого вкладыша, позволяющий проводить выбор подшипникового материала для эффективной работы тяжелонагруженных узлов трения.

На основе новых моделей течения смазки с расплавом и разработанного метода расчета подшипников, содержащих на рабочей поверхности микропористые полимерные составляющие, предложены новые технические решения по усовершенствованию работы упорных, радиальных и сферических подшипников.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены в моторно-осевых подшипниках на электровозах в локомотивных депо Батайск, Кавказская, на тепловозах в локомотивном депо Морозовская (СКЖД), а также в ОАО «РУМС - Южстальконструкция» в узлах и механизмах строительно-монтажных кранов типа СКГ —63/100, МКГ-25Бр; в АОЗТ «ГАРЗ» в двигателе 3M3-53A взамен опорных втулок распределительно вала, а также в ОАО «Донпрессмаш» на установке для рубки арматурных стержней и в листогибочных машинах; на Ростовском машиностроительном заводе, в Ростовских ремонтно-механических мастерских Северо-Кавказского треста стройматериалов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на:

* Всесоюзной научно-технической конференции «Контактно­

гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике» (Куйбышев, 1976 г.);

* Всесоюзной научно-технической конференции «Повышение

износостойкости и срока службы машин» (Киев, 1977 г.);

-Всесоюзной научно-технической конференции «Газовая смазка в машинах и приборах» (Москва, 1989,1990 гг.);

* Всесоюзной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране» (Новочеркасск, 1991 г.);
* Всесоюзной научно-технической конференции «Износостойкость машин» (Брянск, 1991, 1994 гг.);
* Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Ростов-на-Дону, 1999

г-);

* 6-й Международной конференции «Пленки и покрытия - 2001» (Санкт- Петербург, 2001 г.);

-Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт - 2001» (Ростов-на-Дону, 2001 г.);

* Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса Юга России» (Ростов-на-Дону, 2001 г.);
* Международном научно-практическом симпозиуме «Трибология и транспорт» (Рыбинск, 1995 г.);
* Международном конгрессе «Механика и трибология транспортных систем - 2003» (Ростов-на-Дону, 2003 г.)

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 66 работ, в том числе 3 монографии, получено 12 авторских свидетельств и патентов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы расчета триботехнических характеристик тяжелонагруженных подшипников скольжения, позволяющие раскрыть закономерности сложных тепловых и гидродинамических процессов при использовании различных смазочных композиций.
2. Предложен метод прогнозирования профиля опорной поверхности подшипников скольжения, обеспечивающего с учетом нелинейных факторов и реологических свойств смазочных композиций, повышенную несущую способность, температурную и гидродинамическую устойчивость их работы.
3. Разработан метод выравнивания и минимизации плотности температурного поля на рабочей поверхности упорного и радиального подшипников, обеспечивающий повышенную их несущую способность и температурную устойчивость.
4. Установлено, что полученный оптимальный контур рабочей поверхности радиального подшипника обладает гораздо большей устойчивостью, чем традиционный с круговым контуром опорной поверхности.
5. Разработан метод прогнозирования напряженно-деформированного состояния слоистого пористого вкладыша, позволяющий проводить выбор подшипникового материала для эффективной работы тяжелонагруженных узлов трения.
6. Разработана математическая модель гидродинамической смазки, обладающей вязкими и вязкопластичными свойствами, обусловленной расплавом прилегающей опорной поверхности упорного и радиального подшипника; получены аналитические зависимости для основных рабочих характеристик подшипника. В результате численного анализа в широком диапазоне изменения конструктивных, режимных и функциональных параметров найдены условия, при которых повышенная несущая способность подшипника сочетается с аномально низким трением. Установлено, что наличие на рабочей поверхности вкладыша или шипа сверхпластичных сплавов с низкой температурой плавления увеличивает толщину смазочной пленки.
7. Разработан метод гидродинамического расчета основных рабочих характеристик сферических подшипников, работающих в нестационарном режиме с принудительной подачей смазки.
8. Предложен метод прогнозирования оптимального значения соотношения площадей металлических и полимерных зон рабочей поверхности подшипника скольжения.
9. Решена задача гидродинамического расчета радиального подшипника скольжения со ступенчатой рабочей поверхностью с микропористыми полимерными вставками.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в новые конструкции упорных, радиальных и сферических подшипников, защищенных авторскими свидетельствами и патентами; прошли промышленную апробацию и внедрены на ряде предприятий различных отраслей; основные результаты опубликованы в работах [165], [167], [171-172], [177], [179], [183], [185-194], [197-257].