



РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up_del@dep.rgups.ru
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001

16.03.2022 № 23/2150

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
 федерального государственного
 бюджетного образовательного
 учреждения высшего образования «Ро-
 стовский государственный универси-
 тет путей сообщения»
 доктор технических наук, профессор
 А.Н. Гуда



О Т З Ы В

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» на диссертацию Корнеева Андрея Юрьевича «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки)

1. Актуальность темы

В условиях высоких скоростей и значительных динамических нагрузок применение подшипников качения в опорных узлах роторных машин становится проблематичным вследствие недостаточного демпфирования, предельной быстроходности и ресурса. Вследствие этого, существует тенденция альтернативного применения в качестве опор роторов высокоскоростных турбомашин подшипников жидкостного трения, обладающих рядом преимуществ по сравнению с подшипниками качения. Среди множества конструкций подшипников жидкостного трения отдельное место занимают радиально-осевые подшипники. Комбинированные опоры, включающие опорный подшипник и подпятник, являются более сложными по конструкции, обладают большими габаритами и потерями на трение. Одним из возможных решений является применение конических подшипников жидкостного тре-

ния.

Отсутствие в достаточной мере теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению работоспособности конических подшипников жидкостного трения в реальных условиях функционирования, сложность решения теоретической задачи, а также технические трудности установки роторов на данного типа опорах и определяют актуальность выбранной темы диссертации.

2. Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертации заключается в разработке классификации конических подшипников жидкостного трения; формулировании теоретических основ расчета полей давлений в смазочном слое конических подшипников жидкостного трения в неизотермической постановке; разработке математических моделей и алгоритмов расчета несущей способности, расхода смазочного материала, потерь мощности на трение и прокачку, коэффициентов жесткости и демпфирования для различных типов конических подшипников; разработке алгоритма построения пространственных кривых подвижного равновесия в конических подшипниках; решении задачи анализа радиальной и осевой устойчивости движения ротора в конических опорах; разработке математической модели расчета пространственных траекторий движения центра масс ротора.

3. Достоверность результатов исследования

Реализация предложенных расчетных моделей и алгоритмов осуществляется современными математическими методами при помощи программного обеспечения MathCAD и MatLab. Достоверность полученных результатов и практических рекомендаций подтверждается обоснованностью использования соответствующих предпосылок, законов и предложенного математического аппарата исследований, а также удовлетворительным совпадением данных теоретических и экспериментальных исследований.

4. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

1. Разработана методология расчета конических подшипников жидкостного трения в виде методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических подшипниках. На разработанные программы для ЭВМ получены 2 свидетельства о регистрации данных программ.

2. Разработаны новые технические решения конических подшипников жидкостного трения, конструктивные особенности которых позволяют повысить долговечность и надёжность работы опорного узла путём применения дополнительных элементов. Новизна технических решений подтверждается 9 патентами РФ на изобретение и патентом РФ на полезную модель.

Разработанные на основе математической модели программы расчета статических и динамических характеристик, а также программное обеспечение для динамического анализа и устойчивости роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения могут быть использованы в конструкторских бюро и технических отделах промышленных предприятий, занимающихся разработкой, прежде всего насосного и компрессорного оборудования. Результаты работы внедрены и используются при проектировании роторных систем высокоскоростных турбомашин в ОАО «Калужский турбинный завод», ПАО «Кузнецов» (г. Самара), АО «Гидрогаз» (г. Воронеж).

5. Оценка структуры и содержания работы

Диссертация написана четким, технически грамотным языком и включает: введение, шесть глав, заключение, перечень условных обозначений, библиографический список из 274 наименований.

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, которые необходимо решить для их достижения, а также пути и методы их решения. Изложены положения, определяющие научную новизну и практическую ценность полученных результатов, и обосновывается их достоверность. Результаты работы используются при проектировании роторных систем высокоскоростных турбомашин на конических подшипниках жидкостного трения.

В первой главе выполнен анализ изучаемого технического объекта, рассмотрены направления исследования характеристик конических подшипников жидкостного трения, используемых в качестве роторов высокоскоростных турбомашин. Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы по данному вопросу, показавший отсутствие информации по изучению статических и динамических характеристик конических подшипников в условиях переменных теплофизических свойств и нестационарного движения и подтвердивший актуальность темы диссертации.

Во второй главе рассмотрена математическая модель расчета полей давлений в смазочном слое пяти типов конических подшипников жидкостного трения с учетом переменных теплофизических свойств и турбулентного состояния смазочного материала, основанная на совместном решении уравнений Рейнольдса, баланса энергий и расходов смазочного материала.

Третья глава посвящена изучению статических характеристик конических, гладкого, многоклинового и гибридного гидродинамических и конических гидростатических с точечными и прямоугольными камерами подшипников, смазываемых водой, жидким водородом и турбинными маслами. Приводятся результаты расчета статических коэффициентов смазочного слоя с учетом переменных теплофизических свойств и турбулентного состояния смазочного материала.

В четвертой главе рассматривается динамическая модель роторно-опорного узла на конических подшипниках жидкостного трения. Строятся кривые подвижного равновесия в плоскости и пространстве, рассчитываются коэффициенты жесткости и демпфирования,

являющиеся динамическими характеристиками рассматриваемой системы, определяется устойчивость и строятся плоские и объемные траектории движения центра масс ротора.

В пятой главе проводится проверка адекватности разработанных теоретических положений с результатами экспериментальных исследований. Разработанные автором экспериментальные стенды и соответствующие методики проведения опытов позволили провести проверку адекватности математической модели расчета конических подшипников жидкостного трения, работающих на воде и турбинных маслах, и сделать вывод о достоверности разработанной модели.

В шестой главе представлена методология расчета конических подшипников жидкостного трения и даются рекомендации по проектированию высокоскоростных роторных систем на конических опорах, приводится подробное описание разработанных программ, позволяющих рассчитать необходимые статические и динамические характеристики, устойчивость и траектории движения центра масс ротора в коническом подшипнике.

В заключении приведены основные результаты и выводы, даны предложения практического использования работы.

6. Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Личный вклад соискателя состоит в разработке:

- теоретических основ расчета полей давлений в смазочном слое конических подшипников жидкостного трения в условиях переменных теплофизических свойств и турбулентного течения смазочного материала на основе совместного решения модифицированного уравнения Рейнольдса, уравнений баланса энергий и баланса расходов и уравнения взаимосвязи теплофизических свойств;
- математических моделей и алгоритмов расчета несущей способности, расхода смазочного материала, потерь мощности на трение и прокачку конических подшипников;
- алгоритма построения кривых подвижного равновесия в конических подшипниках жидкостного трения;
- математической модели расчета коэффициентов жесткости и демпфирования конических подшипников;
- методологии расчета конических подшипников жидкостного трения в виде методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы в виде методологии проектирования и программного обеспечения могут быть использованы в проектных работах конструкторских бюро и специализированных отделов промышленных предприятий по разработке высокоскоростных турбомашин, турбоагрегатов, энергетических установок и других роторных машин. Новые технические решения конических подшипников жидкостного трения, оригинальность которых подтверждена патентами на изобретения РФ, могут быть использова-

ны для изготовления экспериментальных образцов в составе перспективных роторных машин. Все пункты выводов, сделанных автором, являются правомерными и основаны на реальных результатах, полученных в работе, и подтверждают заявленные к защите положения. Значимость результатов диссертации для энергетического, транспортного и турбомашиностроения заключается в создании теоретических основ внедрения конических подшипников жидкостного трения в модернизируемые роторные машины и агрегаты новых поколений для получения лучших эксплуатационных качеств, снижения массогабаритных размеров и больших конкурентных преимуществ.

8. Анализ публикаций и автореферата

Среди основных публикаций по теме диссертации можно выделить статьи в журналах «Вестник машиностроения», «Компрессорная техника и пневматика», «Известия ОрелГТУ», «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», «Известия ТулГУ. Технические науки», «Известия ЮЗГУ. Естественные науки», «Вестник Брянского государственного технического университета», «Russian Engineering Research», «Journal of Donghua University (English Edition)», «Journal of Harbin Institute of Technology».

По теме диссертационного исследования опубликовано 66 научных работ. Среди них 31 статья в журналах, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России», из них 8 статей в научных журналах, индексируемых в базе данных «Scopus»; 22 статьи в других рецензируемых научных изданиях; 10 патентов на изобретения и полезную модель РФ; 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; издана монография.

Требования к количеству публикаций основных научных результатов диссертации, предусмотренных пунктами 11 и 13 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24 сентября 2013 г., автором выполнены. Требования, установленные п.14 данного Положения, автором соблюдены. Цитирование оформлено корректно; заимствованного материала, использованного в диссертации без ссылки на автора либо источник заимствования, не обнаружено; научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов не выявлено. Диссертационная работа написана понятным языком с корректным использованием специальной научной терминологии.

Автореферат диссертации содержит основные идеи и выводы диссертации, соответствует ее содержанию, показывает вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическую значимость приведенных результатов исследований, раскрывает цель и задачи исследования.

9. Замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокий уровень выполнения работы, в ней присутствуют отдельные недостатки.

1. Одной из главных проблем использования конических подшипников является решение ряда технологических задач, связанных с точностью изготовления, сборки и базиро-

вания рабочих поверхностей, однако в работе недостаточно подробно рассмотрены вопросы проектирования, связанные с анализом влияния погрешностей геометрических размеров и форм, влияющих на характеристики опор и рекомендаций по выбору их предельных значений.

2. Среди многообразия запатентованных конструкций конических подшипников при участии автора в диссертации рассмотрена только одна конструкция в качестве объекта исследования.

3. Представленная в работе математическая модель расчета действующих в жестком роторе сил позволяет учитывать дисбаланс, однако при проведении вычислительных экспериментов данным фактором пренебрегают.

4. Отсутствуют результаты экспериментальных исследований непосредственно несущей способности и коэффициентов жесткости и демпфирования конических подшипников жидкостного трения.

5. Представленные в заключительной главе рекомендации по проектированию конических подшипников не содержат информации по выбору конкретных значений посадок втулок в корпус и обеспечению работы на пусковых режимах.

6. В работе присутствуют стилистические неточности.

Указанные недостатки не снижают ценности выполненной работы и носят, скорее, рекомендательный характер.

Однако указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертация Корнеева Андрея Юрьевича «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения» на соискание ученой степени доктора технических наук выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну, а полученные результаты имеют практическую ценность.

Диссертация соискателя представляет собой самостоятельную, завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научно-техническая проблема, заключающаяся в разработке методологии расчета, комплексном исследовании работоспособности и выработке рекомендаций по проектированию конических подшипников жидкостного трения.

Работа изложена логично, технически грамотно, аккуратно оформлена и проиллюстрирована. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, а выдвигаемые для публичной защиты положения имеют важное научное и практическое значение. Полученные автором результаты достоверны, проверены экспериментально, прошли апробацию и внедрение. Диссертация является итогом целенаправленной самостоятельной работы и свидетельствует о способности автора решать сложные научные и технические задачи.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертация Корнеева А.Ю. по актуальности, степени научной новизны, объему выполненных исследований и их теоретической и практической ценности соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Корнеев Андрей Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат Корнеева А.Ю. рассмотрен на заседании кафедр «Транспортные машины и триботехника», «Основы проектирования машин» и «Высшая математика» с участием представителей НИЛ НиНМ НИЦ НТ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», протокол № 12 от 11 марта 2022 г.

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Транспортные машины
и триботехника»
Тел.: 8 (863) 245-57-48
e-mail: tmt@rgups.ru

Шаповалов Владимир Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Основы
машин проектирования»
Тел.: 8 (863) 272-12-70
e-mail: opm@rgups.ru

Чукарин Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Высшая математика»
Тел.: 8 (863) 272-12-63
e-mail: murman1963@yandex.ru

Мукутадзе Мурман Александрович

Сведения об организации:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,
<http://www.rgups.ru/> e-mail: up_del@rgups.ru, тел.: (863) 255-32-83,