

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, доцента,  
профессора кафедры «Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт»  
(«ФГБОУ ВО НИУ МЭИ») **Куменко Александра Ивановича**  
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)

**Актуальность темы диссертационного исследования.** Разработанное направление связано с новым типом подшипников для роторных машин конического типа. Хотя известен это тип давно, из-за малого количества исследований они практически не применялись в качестве базовых элементов в машиностроении, хотя имеют перспективные технические характеристики в части надежности и ресурса изделий. Имеется множество альтернативных отработанных опорных устройств роторов, основанные на других физических принципах обеспечения несущей способности, в том числе отдельные осевые и радиальные подшипники жидкостного трения, роликовые подшипники качения, магнитные подшипники, газостатические и газодинамические подшипники, которые могут применяться в различных сочетаниях.

В силу слабого развития теоретических и экспериментальных исследований в области расчета и проектирования конических подшипников, а также в связи с трудностью решения комплексной задачи и соответствующих уравнений течения смазки (уравнений гидромеханики) с учетом переменного поля температур, турбулентности, колебаний и пр. приходилось очень осторожно применять данные опоры. Автором выполнена значительная работа по систематизации систематизирует знаний в области конических подшипников и проведении ключевых исследований их несущей способности, статических динамических характеристик, которая является обобщением многолетних исследований, в том числе совместно с коллегами. На основании проведенных им исследований он предлагает для промышленности различных областей законченные комплексные методики расчета и проектирования конических подшипников. Предлагаются компактные, экономичные и надежные опорно-упорные узлы для роторных систем, прежде всего для быстроходной, но мощной спецтехники. Следовательно, данная тема исследований, представленная методология расчетного анализа характеристик роторной системы с коническими подшипниками является актуальной.

### **Общая характеристика, структура и объем работы.**

Представленная диссертация имеет классическую структуру и включает: введение, шесть глав, заключение с перечнем основных результатов работы, список литературы из 274 наименований, 4 приложения, в которых представлены

отдельные тексты программ в среде «Matlab» и свидетельства практического использования разработок. Работа изложена на 320 страницах основного текста, содержит 178 рисунков и 16 таблиц, а так же приложения с 321 по 368 стр.

Во *введении* с 4-й по 14 стр. определены объект исследования – опорные узлы роторов с коническими подшипниками жидкостного трения и предмет исследования – статические и динамические характеристики конических подшипников жидкостного трения. Обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы цель и 10 задач диссертационной работы, которые затем последовательно реализованы в других главах. Далее показана научная новизна и сформулированы применяемые методы исследования, обоснована достоверность полученных результатов и сформулированы выносимые на защиту научные положения, представлены практическая значимость полученных результатов и их реализация. Приведены данные апробации работы, структура и объем работы.

Основные замечания по введению: 1. фактический предмет исследования значительно шире, чем указал автор. Это не только статические и динамические характеристики конических подшипников жидкостного трения, но и динамические характеристики роторных систем с такими подшипниками. 2. Во введении мало отражены проблемы, которые пришлось преодолевать и решать автору.

В *первой обзорной главе* с 15 по 69 стр. рассматриваются конические подшипники, как объект исследования и проектирования. Дана классификация и сформулированы основные принципы работы конических подшипников, проведен обзор научных исследований в данной области, рассмотрены разнообразные конструктивные решения и представлен обзор патентных решений в части конструктивного исполнения. Существенных замечаний по главе нет. Следовало лишь упомянуть в табл. 1.1 о том, что не только зарубежом но и **в СССР тоже были перспективные и практически законченные разработки применения неньютоновской жидкости** в подшипниках для крупного энергетического оборудования, а на ПОАТ ХТЗ имелся стенд, где отработывалась такая смазка.

Во *второй главе* с 70 по 106 стр. представлена неизотермическая математическая модель расчета конических подшипников жидкостного трения, приведены расчетные схемы, в том числе многоклиновых подшипников, представлен алгоритм расчета, вычислительные методы. На базе совместного рассмотрения уравнений Навье –Стокса, уравнения неразрывности в цилиндрических координатах и применении гипотезы прилипания Прандтля использован один из вариантов уравнения Рейнольдса дополненный затем уравнением энергии. Турбулентность смазки учитывается, как это принято в большинстве других подобных работ, двумя коэффициентами, принятыми по методике Константинеску и приведенными к цилиндрическим координатам  $r$  и  $\varphi$ . Сформулированы граничные условия, при которых должны быть решены соответствующие уравнения. Представленные уравнения дополнены уравнениями баланса расходов для уточнения давлений и расходов в питающих камерах и форсунках. Расходные характеристики так же необходимы для сравнительной оценки вариантов подшипников, наряду с основными по несущей способности,



определяющими надежность и ресурс. Для интегрирования уравнений применены современные устойчивые численные методы.

В качестве пожеланий следовало бы добавить вопросы взаимного смещения опор с коническими подшипниками, что имеет место при эксплуатации роторов и может оказать существенное влияние на все рассматриваемые их характеристики.

В *третьей главе* рассмотрены статические и динамические характеристики гидродинамических и гидростатических подшипников в условиях переменных теплофизических свойств и турбулентного состояния смазочного материала. Приведена дополнительно часть формул, в том числе для расчета реакций смазочного слоя и потерь мощности на трение и прокачку смазочного материала. Для различных конструкций гладких, многоклиновых и комбинированных конических подшипников приведены многочисленные графики и диаграммы, дается оценка влияния различных эффектов на характеристики конических подшипников с опорной поверхностью различной геометрической формы. Приведена методика расчета.

К сожалению, как и в главе 2 в данной главе не сделано обобщающих частных выводов по многочисленным интересным результатам.

В *четвертой главе* (стр.152-193) проведены численные эксперименты и выполнен динамический анализ на примере упрощенной роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения. При этом варьировались разные смазочные жидкости: вода, жидкий водород. Турбинное масло, масло ТП-30. Получены традиционные кривые подвижного равновесия. Приведены динамические модели подвеса роторов на конических опорах, рассчитываются коэффициенты жесткости и демпфирования, решается задача обеспечения устойчивости движения роторов на конических подшипниках, строятся плоские и пространственные траектории движения центра цапфы ротора методом траекторий.

Обычно в классических энергетических подшипниках **коэффициенты жесткости и демпфирования приводятся в безразмерном виде в зависимости от некоторой приведенной величины коэффициента нагруженности.** Здесь так же можно было бы ввести этот параметр по среднему диаметру подшипника по аналогии с классическими подшипниками. Можно считать, что это так же пожелание.

Анализ устойчивости проведен в классической форме для линейной системы с построением характеристического уравнения в виде многочлена 6-й степени относительно искомым комплексных частот  $\lambda$ . Мне больше по душе применение программы отыскания собственных значений аналогичной несимметричной матрицы и анализ движения корней на комплексной полуплоскости с определением запасов устойчивости при изменении любых параметров системы.

Кроме того, при анализе самих коэффициентов жесткости и демпфирования важно анализировать не сами величины, а работу этих сил, что очень важно для анализа устойчивости. Так же следовало бы оценивать параметры анизотропии жесткости, что так же значительно влияет на запасы устойчивости роторной системы.

В *пятой главе* (стр. 194-227) приведены результаты экспериментальных исследований конических подшипников жидкостного трения. Дана постановка задач, использована теория планирования эксперимента, подробно представлена методика проведения факторного анализа и выполнен анализ результатов экспериментальных исследований. Подробно рассмотрены конструкции малогабаритных экспериментальных установок. Основной диск, определяющий инерционные характеристики ротора посажен на вал с натягом. По результатам эксперимента показано удовлетворительное совпадение кривых всплытия, полученных расчетным и экспериментальным способами, а так же сделан частный вывод о том, что при жестком креплении конических подшипников жидкостного трения, длительная эксплуатация ротора возможна при непревышении в среднем скорости вращения удвоенной первой критической частоты вращения. При этом **осталось не ясным, какие резервы повышения устойчивости имеют эти подшипники.** Для этого необходимо расширить варьирование зазоров, провести оптимизации степени эллиптичности таких подшипников, проверить влияние анизотропии и величины зазора. Для выравнивания зазора вдоль оси подшипника, можно было рассмотреть его изменение, например, при равной безразмерной удельной нагруженности вдоль оси подшипника.

В *шестой главе* (стр. 228-283) подняты вопросы проектирования конических подшипников жидкостного трения и даны рекомендации по расчету и проектированию конических опор скольжения. Приведен алгоритм автоматизированного проектирования таких подшипников. Так же приведены описания программ расчета характеристик гидродинамических и гидростатических подшипников скольжения и программного обеспечения для динамического анализа конических подшипников и построения плоских и пространственных траекторий движения центра цапфы. При этом использованы также современные численные методы. Предлагается алгоритм выбора структуры радиально-осевых опор роторов. Предлагается оптимизация угла конусности в зависимости от соотношения осевой и радиальных нагрузок. Очень важным явился анализ влияния упруго-демпферного крепления конического подшипника на границу устойчивости по частоте вращения. Показано, что упруго-демпферное крепление несколько увеличивает границу устойчивости экспериментального ротора. Рассмотрены вопросы нагрева ротора или корпуса и изменения зазоров в коническом подшипнике, при этом не рассматривается связь этих процессов с изменением температурного поля в масляном слое, которое может быть существенно неравномерным. При этом **не обсуждается вопрос, когда соотношение радиальной и осевой нагрузок может меняться на разных режимах.** Желательно так же программный комплекс дополнить автоматическим поиском границ устойчивости роторных систем путем анализа движения корней на комплексной полуплоскости. С другой стороны, используемые численные методы интегрирования уравнений движения с получением траекторий движения при разных видах возмущения и классический метод D-разбиений имеют преимущество в том, что они позволяют учитывать нелинейные свойства вплоть до задеваний шеек роторов.



В **Заключении** представлены выводы по диссертационной работе, которые соответствуют поставленным цели и задачам исследования, последовательно решенных во 2-6 главах, полностью основываются на результатах исследования и сведениях, приведенных в диссертации. К сделанным выводам можно было бы добавить общий вывод о том, что данная работа подтвердила потенциальные возможности обеспечения устойчивого движения ротора в конических подшипниках скольжения и возможность их практического применения в различных малогабаритных транспортных и других энергетических установках.

В **приложениях А-Г** приведены расширенные листинги отдельных программ расчета характеристик конических подшипников и материалы, подтверждающие практическое внедрение результатов работы.

**Степень обоснованности и достоверности полученных результатов, научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе,** достаточно высокая, что подтверждается результатами тщательных расчетных и экспериментальных исследований, достаточно хорошим совпадением расчетных результатов с экспериментальными, научным обоснованием полученных результатов, их современной математической обработкой.

Достоверность полученных данных подтверждается также результатами опытно-промышленных испытаний.

**Личный вклад автора** не вызывает сомнений, так как результаты проведенных исследований не только широко освещены на международных и всероссийских научно-практических конференциях, но значительная их часть опубликована и доложена автором лично.

**Научная новизна исследований** заключается в обобщении и систематизации целого ряда отечественных и зарубежных работ, в формировании методологии расчета, в получении впервые ряда расчетных результатов, в методологии проведения динамического анализа и проектирования конических подшипников жидкостного трения на основе совместного решения уравнений гидродинамики, термодинамики, теплофизики и теории колебаний. Большинство экспериментов также проведены впервые.

#### **Значение результатов исследований для науки и производства.**

Разработанные на основе разработанных математических моделей и программ расчета статические и динамические характеристики, выполненная их частичная оптимизация, и проведенные исследования 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).

Результаты научных исследований докладывались и обсуждались на российских и зарубежных конференциях и симпозиумах. Основные положения диссертационной работы изложены в 66 научных публикациях, включая 53 статьи,

из которых 31 в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Перечнем высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, монографию, 9 патентов РФ на изобретение, патент РФ на полезную модель и 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация изложена ясным языком, написана грамотно без существенных замечаний. Кроме высказанных по главам пожеланий следует отметить, что данная работа проложила новое направление исследований и хотя является законченной, в ней не раскрыты все резервы повышения границ устойчивости роторных систем, не рассмотрены реальные условия работы таких систем при переходе энергетической установки из холодного или неостывшего состояния в горячее состояние. Есть резервы в оптимизации конструкции как самих подшипников, так и системы в целом.

**Заключение о соответствии диссертационной работы Корнеева А.Ю. требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационная работа Корнеева А.Ю. «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения» содержит важные для ряда отраслей промышленности РФ новые научно-практические результаты, внедренные на ряде предприятий и представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9-14 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор, Корнеев Андрей Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2. «Машиноведение» (технические науки).

Официальный оппонент

д.т.н. доц., профессор кафедры  
«Робототехники, мехатроники, динамики и  
прочности машин» «ФГБОУ ВО НИУ  
МЭИ». Специальность: 05.04.12  
«Турбомашины и комбинированные  
установки».

Куменко А.И.

29.03.2022



*Согласен удостоверить*

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ  
И.И. НИДЕВАЯ

«ФГБОУ ВО НИУ МЭИ» ,  
111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,  
Красноказарменная ул, д.14, стр. 1  
тел. +7 (495) 362-70-01  
эл. почта:  
universe@mpei.ac.ru