

Отзыв официального оппонента

доктора технических наук, доцента,

заместителя главного конструктора по науке и новым технологиям

АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко»

Иванова Андрея Владимировича

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. Развитие турбомашин неразрывно связано с повышением частоты вращения ротора. С ростом скоростей и динамических нагрузок применение подшипников качения в опорных узлах роторных машин становится проблематичным из-за предельной быстроходности и недостаточного ресурса. Альтернативным вариантом является применение подшипников жидкостного трения в качестве опор роторов. Высокооборотные роторные машины, как правило, работают в условиях воздействия на ротор значительных осевых и радиальных нагрузок, что требует их компенсации. Одним из возможных вариантов комплексного решения задачи создания опор высокооборотных турбомашин является применение конических подшипников жидкостного трения, воспринимающих и компенсирующих как осевые, так и радиальные нагрузки.

В настоящее время вопросы расчета и проектирования конических подшипников жидкостного трения изучены недостаточно полно. В связи с этим работа, посвященная систематизации знаний в области создания конических подшипников жидкостного трения, предлагающая методики расчета и проектирования конических подшипников представляется актуальной.

Общая характеристика, структура и объем работы.

Диссертационная работа включает введение, шесть глав, заключение и список литературы из 274 наименований, 4 приложения, изложена на 320 страницах текста, содержит 178 рисунков и 16 таблиц, список использованных источников.

Во *введении* автором обоснована актуальность, представлена степень разработанности темы исследования, приведены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость достигнутых результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, приведены сведения о апробации и достоверности полученных результатов.

В *первой главе* приведены обзор исследований в области создания конических подшипников, проанализированы различные конструктивные исполнения и принципы

работы конических подшипников, представлен патентный обзор, приведена классификация конических опор роторов.

Во *второй главе* представлена математическая модель расчета конических подшипников жидкостного трения, приведены расчетные схемы, алгоритм расчета, описаны использованные вычислительные методы.

В *третьей главе* приведена методика расчета статических и динамических характеристик гидродинамических и гидростатических конических подшипников в условиях переменных теплофизических свойств и турбулентного состояния смазочного материала, приведены соответствующие графики и диаграммы, дана оценка влияния различных факторов на параметры и характеристики конических подшипников.

В *четвертой главе* рассмотрен динамический анализ роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения, приведены динамические модели подвеса роторов на таких опорах, приведен расчет коэффициентов жесткости и демпфирования, приведено решение задачи обеспечения устойчивости движения роторов на конических подшипниках, представлены плоские и пространственные траектории движения центра цапфы ротора методом траекторий.

В *пятой главе* приведены результаты экспериментальных исследований конических подшипников жидкостного трения. Рассмотрены конструкция экспериментальных стендов и установок для испытания подшипников, рассмотрены методика проведения и анализа результатов экспериментальных исследований.

В *шестой главе* автором рассмотрена структура проектирования конических подшипников жидкостного трения, приведены рекомендации по их расчету и проектированию, описаны программы расчета характеристик гидродинамических и гидростатических конических подшипников, динамического анализа конических подшипников, построения плоских и пространственных траекторий движения центра цапфы подшипника.

В *заключении* представлены выводы по диссертационной работе, которые основываются на результатах исследования и сведениях, приведенных в диссертации.

В *приложении* приведен листинг программ расчета характеристик конических подшипников и материалы, подтверждающие внедрение результатов работы.

Список литературы содержит 274 источника.

Степень обоснованности полученных результатов, научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается обоснованностью использования соответствующих предпосылок, законов, допущений, применением известных математических методов, корректностью постановки задач исследования, теоретическим обоснованием, использованием современных методов и средств экспериментальных исследований, качественным согласованием результатов

теоретических исследований с экспериментальными данными, а также положительным опытом использования полученных результатов при проектировании роторных систем с опорами жидкостного трения.

Научная новизна исследований, выполненных автором диссертационной работы заключается в формировании теоретических методов расчета конических подшипников жидкостного трения, основанных на применении базовых уравнений гидродинамической теории смазки и термодинамики с учетом турбулентности, совместного действия напорных и сдвиговых течений, изменения теплофизических свойств смазочного материала в смазочном слое, включая расчет полей давления в зазоре, несущей способности подшипника, расхода рабочего тела и потерь мощности в опоре, коэффициентов жесткости и демпфирования, алгоритм построения пространственных кривых подвижного равновесия в конических подшипниках жидкостного трения и математическую модель расчета пространственных траекторий движения центра масс ротора.

Значение результатов исследований для науки и производства.

Разработанные на основе исследований автора математическая модель, программы расчета статических и динамических характеристик, динамического анализа и устойчивости роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения могут быть использованы при проектировании опор роторов для насосов и компрессоров. Практическая ценность работы подтверждается использованием её результатов при проектировании роторных систем турбомашин в ОАО «Калужский турбинный завод», ПАО «Кузнецов» (г. Самара), АО «Гидрогаз» (г. Воронеж).

Основные результаты диссертации опубликованы в печати, докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах различного уровня, изложены в 66 научных трудах, 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, монографии, 9 патентах РФ на изобретение, патенте РФ на полезную модель и 2 свидетельствах об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Основные положения диссертации достаточно полно отражены в автореферате.

Диссертация написана технически грамотным и понятным языком, иллюстрирующим научный и практический квалификационный потенциал автора. Оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым требованиями ВАК РФ к диссертационным работам. Диссертационная работа является законченным научным исследованием, в котором сделана корректная постановка целей и задач, рассмотрены теоретические основы и разработаны математические модели и программное обеспечение, представлены результаты экспериментальных

исследований, предложены рекомендации по применению полученных результатов. Выводы и заключения по работе обладают новизной и практической значимостью.

Вопросы и замечания к содержанию и оформлению диссертации.

При общей положительной оценке считаю необходимым сделать следующие замечания к диссертационной работе:

1. Автором не используются методы расчетов в трехмерной постановке, позволяющие более точно учесть особенности поведения подшипников, а делается вывод о том, что «развитие современной вычислительной техники и программного обеспечения в перспективе позволят реализовать задачи по расчету полей давлений, температур, а также стационарных и динамических характеристик в смазочных слоях конических подшипников жидкостного трения с использованием 3D-моделей», хотя в настоящее время подобные методы расчета весьма развиты и широко используются, в том числе с применением отечественного программного обеспечения. Кроме того, методы трехмерного моделирования позволяют решать не только задачи гидродинамики в опорах скольжения, но и, что особенно важно для практики, сопряженные задачи: гидродинамика-теплообмен-деформации. Решение сопряженных задач существенно снижает расходы на создание опорных узлов, т.к. за счет численного эксперимента снимает ряд вопросов, возникающих при проектировании.

2. Один из проблемных вопросов создания любых подшипников скольжения – обеспечение работоспособности при запуске и останове рассмотрен недостаточно полно.

3. В обзоре говорится о водороде, высокоскоростных машинах, но нигде не упомянуто о турбонасосных агрегатах ЖРД, например, конический подшипник применялся и применяется в системе авторазгрузки ротора насоса окислителя двигателя РД253 первой ступени ракеты-носителя «Протон» (Р.В. Мартемьянов. Учебно-методическое пособие по лабораторной работе «Изучение изделия РД-253». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ». С. Петербург 1997 г.), системе авторазгрузки ротора водородного турбонасосного агрегата двигателя RL-50 (Chapman, L., Crease, G., Friant, J., Grabowski, Robert, Schmidt, E. (2000). Testing of an Advanced Liquid Hydrogen Turbopump), имеющего частоту вращения 166700 об/мин. Причем ротор водородного турбонасосного агрегата RL-50 был установлен на опорах жидкостного трения и для обеспечения их работоспособности была реализована обширная научно-исследовательская программа, которая не привела к созданию работоспособной конструкции. Почему эти работы не были рассмотрены автором диссертации.

4. В работе не рассмотрены вопросы расчета конических подшипниках при

перекосах, неравномерном зазоре, неравномерных (не осесимметричных) деформациях, осевом ходе ротора, что характерно для высоконагруженных высокооборотных турбомашин.

5. Вызывает сомнение утверждение, приведенное на с. 71 «при правильно подобранном давлении подачи и геометрических характеристиках многоклиновые подшипники способны почти полностью подавлять вихрь и биение роторов высокоскоростных турбомашин», особенно в части биения.

6. Почему турбулентное течение описывается с помощью коэффициентов турбулентности по методике Константинеску? Сегодня достаточно много моделей турбулентности и было бы здорово их сравнить между собой и с экспериментальными данными, что позволило бы существенно повысить точность расчетов, особенно при применении трехмерных расчетов.

7. Хотелось бы увидеть более подробные объяснения физических процессов, приведших к результатам, приведенным на с. 141 и с. 142. Характерно ли такое поведение для любых маловязких жидкостей.

8. Не очень понятен вывод на с. 147 по поводу турбулентности. Для высокооборотных нагруженных турбомашин течение в зазоре подшипника жидкостного трения как правило будет турбулентным, а не ламинарным.

9. Почему отдельно проводится динамический анализ подшипников и роторов, опоры рассматриваются в отрыве от остальной конструкции. Подчиняются ли они принципу суперпозиции. Из с. 153 следует, что надо рассматривать ротор и опоры совместно.

10. Не приведен анализ погрешностей измерений для всех параметров и его влияние на точность интерпретации результатов. Такой анализ должен быть приведен либо в работе, либо в приложении к ней.

11. На с. 227 указано, что получено качественное согласование теории и эксперимента, а количественная оценка не приведена, что может быть важно для проектирования турбомашин.

12. В разделе 6 хотелось бы видеть рекомендации, возможна ли для таких опор полная взаимозаменяемость или нет, требуется подгонка и настройка для каждого конкретного экземпляра. Хотелось бы видеть более конкретные методики, алгоритмы, конструкции, обеспечивающие работоспособность при запуске и останове, на номинальном режиме, рекомендации по точности, назначению допусков, применяемым материалам.

13. Рассматривается в т.ч. жидкий водород, а коэффициенты линейного расширения даны в диапазоне от 0 до 100 °С.

14. В работе целесообразно было бы все величины приводить в СИ, значения

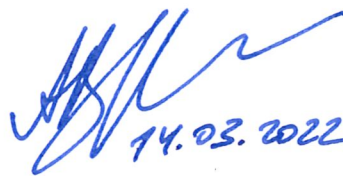
давление приведены в СИ, а температура – в °С, температурные коэффициенты линейного расширения – в СИ (K⁻¹).

Указанные замечания не снижают высокой положительной оценки работы и носят скорее рекомендательный характер.

Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационная работа Корнеева А.Ю. «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения» представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, соответствующую 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., доцент, заместитель
главного конструктора
АО «НПО Энергомаш
им. академика В.П. Глушко»
по науке и новым технологиям



14.03.2022

А.В. Иванов

141400, Россия, Московская область, г. Химки
ул. Бурденко, д.1
+7 (495) 286-91-13
energo@npom.ru

Подпись официального оппонента
Иванова А.В. заверяю,
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 74.1.009.01, к.т.н.



Е. Н. Семина