

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Сорокина Фёдора Дмитриевича на диссертационную работу Храмина Романа Владимировича «Особенности проектирования опоры радиально-упорного шарикового подшипника авиационного газотурбинного двигателя с консистентной системой смазки», представленную в диссертационный совет Д 212.125.08 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Подшипниковые узлы являются важнейшими структурными элементами различных машин и приборов. Хотя конструкция подшипника на первый взгляд является довольно простой (кольца, тела качения, сепаратор), при работе подшипника возникает множество физических явлений, которые существенно взаимосвязаны одно с другом. К наиболее значимым физическим явлениям следует отнести: контактное взаимодействие тел качения с дорожками качения (в том числе с учетом трения), гидродинамические эффекты в смазке, изгиб колец от нагрузки со стороны тел качения, изменение размеров колец от действия центробежных сил и температурных деформаций, интенсивный нагрев. Исследование каждого из указанных явлений требует довольно сложного математического аппарата или экспериментального подхода. Комплексное исследование всего подшипникового узла в целом, особенно с учетом внешнего охлаждения, по-прежнему является очень важной, но трудно выполнимой технической проблемой.

Особенно высокие требования предъявляются к подшипникам качения с консистентной системой смазки, применяемых в опорах малоразмерных короткоресурсных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Долговечность, грузоподъемность и надежность работы таких подшипников в значительной степени зависят от их рабочей температуры, осевых и радиальных градиентов температур колец, системы охлаждения и действующих нагрузок.

Растущая теплонапряженностью современных короткоресурсных авиационных ГТД требует исследования температурного состояния подшипников с консистентной смазкой и проектирование необходимой системы воздушного охлаждения, чему и посвящена рассматриваемая диссертация.

В связи с изложенным выше тема диссертации является весьма **актуальной.**

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«05» 03 2021 г.

Диссертационная работа Храмина Р.В. выполнена в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и состоит из введения, пяти глав, заключения, основных выводов и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведены постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и представлены методы исследования.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных различным конструкциям современных подшипниковых узлов в составе опор авиационных ГТД. Рассмотрены магнитные подвесы, газодинамические подшипники, традиционные подшипниковые опоры, совмещенные опоры, керамические подшипники, но наибольшее внимание уделено подшипникам с консистентной смазкой. Указаны особенности создания опор на подшипниках с консистентной смазкой, их преимущества и недостатки. Представлена методика расчета долговечности и теплового состояния подшипников данного вида.

Во второй главе изложены основные положения теории расчета теплового состояния подшипника. Проанализированы причины, вызывающие сопротивление вращению подшипника, связанные с потерями энергии при перекачивании тел качения, при их скольжении относительно дорожек качения и сепаратора. Указано, что потери мощности от всех перечисленных выше составляющих сил сопротивления нагревают подшипник, тепловой поток от которого должен отводиться за счет хладагента через стенки корпуса в окружающую среду. Приведено и проанализировано структурное уравнение для оценки теплового потока, эквивалентного мощности, расходуемой на привод подшипника.

Представлена система уравнений, характеризующая движение смазки вдоль оси канала, с помощью которой обоснован выбор критериев подобия. Далее набор критериев подобия проанализирован и из них выбраны три наиболее значимых критерия, которые названы «определяющими». С учетом того, что точное математическое описание сложного процесса перемешивания смазки в канале подшипника не представляется возможным, сделан вывод о том, что единственным практически возможным способом исследования этого движения является экспериментальный путь с обобщением опытных данных методами теории подобия.

Завершается глава построением решения основного критериального уравнения, в котором ключевую роль играют выбранные ранее определяющие критерии. При этом делается вывод, что для завершения

решения построенного уравнения необходимы данные, которые можно получить только из эксперимента.

Большой интерес для практики представляет **третья глава** диссертации, в которой разработан косвенный способ измерения осевой силы, действующей на радиально-упорный шарикоподшипник. Прямое измерение указанной осевой силы традиционными силоизмерительными устройствами в работающем двигателе не представляется возможным. В качестве силоизмерительного устройства используется неподвижное кольцо, на котором выполнены пазы для размещения в них тензорезисторов.

Электрический сигнал с тензорезисторов анализируется традиционным методом Фурье, а из полученного спектра выделяется составляющая, связанная с изменением механических напряжений в неподвижном кольце при перекачивании тел качения. Очевидно, что увеличение осевой силы приводит к увеличению соответствующего электрического сигнала, снимаемого с тензорезисторов. Предварительный расчет с использованием МКЭ показывает, что связь деформаций тензорезисторов и величины осевой силы является практически линейной. Для градуировки тензорезисторов подшипника перед его постановкой в двигатель разработана специальная экспериментальная установка.

Данный способ позволяет контролировать техническое состояние подшипника путем анализа спектра частот электрического сигнала с тензорезисторов непосредственно при эксплуатации двигателя, а при необходимости вносить корректирующие действия, нацеленные на снижение осевой силы. Показано, что тепловое состояние подшипника и частота вращения мало сказываются на точности разработанного метода, что делает его еще более ценным.

Четвертая глава диссертации также представляет большой интерес для практики. Подшипники с консистентной смазкой позволяют отказаться от масляной системы, что заметно снижает массу ГТД. Но рабочая температура консистентной смазки, как правило, ниже чем у традиционных авиационных масел, поэтому требуется точная оценка теплового состояния подшипника. Для обоснования работоспособности двигателя с подобными подшипниками был создан и верифицирован расчетно-экспериментальный метод исследования теплового состояния шарикоподшипников.

Расчетная часть метода основана на использовании обоснованных во второй главе «определяющих» критериев подобия. На основе разработанного критериального подхода был произведен расчет тепловыделения в подшипнике при различных частотах вращения ротора и значениях осевых сил, которые определялись по методике, изложенной в третьей главе.

Экспериментальная часть сводилась к измерению температуры наружного кольца и расхода охлаждающего воздуха. Результаты расчетов и экспериментов сведены в обширные таблицы. Зависимости расчетных и экспериментальных коэффициентов сопротивления тепловыделения от частоты вращения ротора очень хорошо соответствуют друг другу. Аналогично ведет себя и тепловыделение. Однако для тех же величин в зависимости от осевой силы расхождение с экспериментом становится более заметным.

Пятая глава представляет из себя сочетание методик, разработанных в предыдущих главах диссертации, и 3D моделирования теплового состояния узла опоры компрессора с помощью комплекса ANSYS. Как уже говорилось выше, подробный комплексный анализ всех явлений в подшипнике (механических, гидродинамических, тепловых) в рамках одной модели невозможен. Поэтому был сделан ряд упрощений, в частности не рассматривались тела качения и течение смазки. Тепловыделение в подшипнике вычислялось по методу, представленному в предыдущих главах.

Сделанные упрощения позволили сократить размерность модели до разумного уровня и рассмотреть тепловое состояние металлических деталей, течение воздуха и явление теплообмена между ними. Была изучена структура течения охлаждающего воздуха, подробно исследовано тепловое состояние конструктивных элементов системы охлаждения подшипника и был определен необходимый для охлаждения подшипника расход воздуха на разных режимах работы ГТД.

В результате сочетания расчетно-экспериментального метода и МКЭ была разработана оптимизированная по расходу воздуха геометрия каналов системы охлаждения подшипника, позволившая обеспечить допустимый температурный режим в зависимости от действующей осевой силы, температуры и расхода охлаждающего воздуха.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автором изучены и проанализированы известные достижения других авторов, а также имеющийся практический опыт в области использования радиально-упорных шарикоподшипников с консистентной смазкой, применяемых в опорах авиационных ГТД. Список литературы содержит 92 наименования. На основе проведенного анализа был разработан расчетно-экспериментальный метод прогнозирования теплового состояния шариковых подшипников с консистентной смазкой. Спланированы и выполнены

оригинальные взаимосвязанные эксперименты: первый - по определению осевой силы методом тензометрирования в сочетании с Фурье-анализом, второй - по прямому измерению тепловыделения в подшипнике работающего двигателя. Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, подтверждается соответствием полученных расчетных значений результатам проведенных испытаний.

Достоверность экспериментальных результатов обоснована проведением испытаний на аттестованном в установленном порядке оборудовании. Достоверность расчётов обоснована применением классических подходов известных авторов в области теории теплообразования в подшипниках, а также использованием лицензионного программного обеспечения – конечно элементного комплекса ANSYS.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 2 работы, получено 5 патентов на изобретение. Основные положения, выносимые диссертантом для публичной защиты, прошли успешную апробацию в рамках научно-технических конференций российского и международного уровней.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- разработан и апробирован новый расчетно-экспериментальный метод исследования теплового состояния радиально-упорных шариковых подшипников с консистентной смазкой;
- впервые разработан и реализован метод косвенного измерения осевого усилия, действующего на подшипник, сочетанием динамического тензометрирования с Фурье – анализом;
- благодаря разработанному методу были определены величины осевых сил ряда двигателей авиационного назначения;
- экспериментально установлен характер влияния осевой силы и частоты вращения ротора на тепловое состояние подшипника;
- с помощью сочетания расчетно – экспериментального метода и комплекса ANSYS удалось оптимизировать систему охлаждения подшипника и рассчитать необходимый расход воздуха.

Практическая значимость результатов исследований:

- разработанный расчетно-экспериментальный метод позволяет предсказать тепловое состояние шариковых подшипников с консистентной смазкой других размеров и тем самым сократить количество экспериментальных исследований;
- метод косвенного измерения осевой силы сочетанием динамического тензометрирования с Фурье – анализом

представляет самостоятельный интерес и может применяться для различных роторных машин, а не только для ГТД;

- применение разработанного метода позволяет оптимально распределить охлаждающий воздух на подшипники качения и на другие элементы конструкции;
- правильный расчет расхода охлаждающего воздуха является необходимым условием для улучшения теплового состояния консистентной смазки и тем самым повышения надежности ГТД.

В качестве замечаний и недостатков диссертации следует отметить:

1. Судя по пятой главе диссертации ее автор владеет решением задач вычислительной газовой динамики с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Но задача из второй главы о течении смазки при вращении внутреннего кольца подшипника тоже могла быть решена тем же комплексом ANSYS CFX. Почему не была использована эта возможность?

2. Уравнения движения смазки (2.2) – (2.4) и следующие за ними критерии подобия (2.5) – (2.8) недостаточно прокомментированы, поэтому их трудно анализировать. Не раскрыты обозначения (некоторые из них не являются общепринятыми), не показаны размерности. Особенно трудно читаются некоторые эмпирические формулы из первой главы, в которых не указаны единицы измерения, входящих в них величин.

3. Значительную часть четвертой главы (более 40% содержания главы) занимают таблицы. Вполне достаточно было бы оставить в тексте диссертации для примера одну такую таблицу, а остальные таблицы заменить описанием или графиками. При необходимости оставшиеся таблицы целесообразнее было бы перенести в приложение.

4. Выводы по многим главам носят декларативный характер. Например, вместо «Выполнен обзор...» целесообразнее было бы сформулировать: «Выполненный обзор показал, что...».

5. В тексте диссертации встречаются опечатки в формулах и некоторых заголовках.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, не снижают научной и практической ценности проведенного исследования.


Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Храмина Романа Владимировича является завершенной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой. Автором решена важная научная задача прогнозирования

температурного состояния радиально-упорных подшипников с консистентной смазкой и проектирования необходимой системы воздушного охлаждения таких подшипников, имеющая существенное значение при создании перспективных малоразмерных авиационных ГТД. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Диссертация соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор, Храмин Роман Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Доктор технических наук (01.02.04), доцент,
профессор кафедры «Прикладная механика»
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»,

 Ф.Д. Сорокин

«03» марта 2021 г.

Сорокин Фёдор Дмитриевич

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Телефон: (499) 263-63-91

E-Mail: bauman@bmstu.ru

Подпись Ф.Д. Сорокина заверяю:



А. Г. Матвеев

ЗАМ. НАЧ УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ: 8499-263-67-69

Сотрудник ознакомлен.
 5.03.21 Р.В. Храмин