



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «УГАТУ»)

К. Маркса ул., д. 12, г.Уфа, 450008. Тел.: 7 (347) 294-38-29; 8-908-350-35-82, e-mail: office@ugatu.su; <http://www.ugatu.su>
ОКПО 02069438, ОГРН 1030203899527, ИНН/КПП 0274023747/027401001

№ _____
На № _____ от _____

“УТВЕРЖДАЮ”

Первый проректор по науке
ФГБОУ ВО “УГАТУ”,
д.т.н., профессор



Р.Д. Еникеев

02 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Храмина Романа Владимировича «Особенности проектирования опоры радиально-упорного шарикового подшипника авиационного газотурбинного двигателя с консистентной системой смазки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов

- **Актуальность темы исследования.**

Диссертационная работа Храмина Р.В. посвящена решению задачи исследования температурного состояния подшипников с консистентной смазкой для малоразмерных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и проектирования системы их воздушного охлаждения. В отличие от традиционных циркуляционных систем смазки с маслобаками, насосами и трубопроводами, применение подшипников с консистентной смазкой позволяет заметно снизить массу авиационных ГТД, особенно малоразмерных. При этом подшипники опор ГТД относятся к числу наиболее ответственных деталей, определяющих срок службы и надежность работы двигателей. В свою очередь, долговечность, грузоподъемность и надежность работы подшипников в значительной степени зависят от их рабочей температуры, осевых и радиальных градиентов температур колец, системы охлаждения и действующих нагрузок.

Применение консистентной системы смазки требует организации достаточного охлаждения подшипника воздухом при его минимальном расходе для обеспечения допустимой температуры смазки, а также регламентирование действующих нагрузок. В связи с этим диссертационная работа Храмина Р.В.,

20 02 2021 г.

001071 *

направленная на разработку расчетной методики оценки теплового состояния радиально-упорного шарикового подшипника с консистентной смазкой и ее экспериментальную отработку, представляется весьма актуальной.

• **Оценка структуры и содержания работы**

В первой главе диссертации приводятся результаты аналитического обзора работ, посвящённых исследованиям и разработке новых технологических решений, связанных с совершенствованием узлов подшипниковых опор перспективных авиационных двигателей. Приводится сравнительный анализ достоинств и недостатков различных видов опор роторов ГТД, обосновывается выбор технического решения, основанного на применении консистентной смазки и керамических тел качения. Выявлен необходимый для разработки таких опор комплекс работ, взаимосвязанных в рамках единого цикла проектирования, включающий в себя части:

- поиск хладагента с параметрами, которые обеспечат работоспособность подшипника;
- обоснование долговечности подшипника с консистентной смазкой;
- разработка методики определения теплового состояния подшипника.

Во второй главе представлены теоретические основы к описанию вязкого движения смазки внутри подшипника без теплообмена с внешними элементами конструкции и подвода охлаждающего воздуха. Предложена система уравнений, описывающая работу подвижных частей подшипника, включающая в себя уравнение неразрывности, уравнения движения смазки и уравнение переноса энергии. Указанная система уравнений использует зависимости теплофизических параметров смазки от температуры.

После преобразования этой системы уравнений методами теории подобия получена структурная формула для искомого суммарного коэффициента сопротивления вращению, учитывающая выделение тепла как сумму тепловых потоков от потерь на гидродинамическое трение в зазорах между телами качения и кольцами, а также потерь на преодоление гидродинамических сопротивлений при движении и перемешивании смазки телами качения в элементах подшипника.

Сформулированы цели и задачи экспериментальных исследований с подшипником качения для подтверждения принятых допущений, а также справедливости представленного решения для определения коэффициента сопротивления.

Третья глава посвящена разработке способа измерения осевого усилия, действующего на радиально-упорный шарикоподшипник передней опоры ротора ГТД. Для измерения величины осевого усилия, воспринимаемого шарикоподшипником, а также для оценки характера его изменения, узел

шарикоподшипника дорабатывается под установку в него тензометрического кольца.

Для обеспечения возможности измерения осевого усилия в обе стороны с базового и противоположного торцов подшипника выполняются специальные пазы, в которых размещаются тензорезисторы. Ширина паза выбирается максимально большой, но не более расстояния между соседними телами качения, с целью исключения возможности одновременного нахождения двух тел качения под пазом.

В четвёртой главе представлены экспериментальные работы, которые были проведены для верификации методов расчета теплового состояния опор с подшипниками качения и консистентной смазкой в составе газотурбинного двигателя.

Эксперименты проводились на специальной установке по исследованию подшипников, охлаждаемых воздухом из цеховой магистрали, с варьированием осевой нагрузки. При испытаниях измерялась температура наружного кольца и расход охлаждающего воздуха. Также приведены результаты испытаний аналогичного подшипника в составе двигателя.

В результате проведенных испытаний был верифицирован метод расчета теплового состояния подшипников с консистентной смазкой, охлаждаемых воздухом. Получены коэффициенты для использования в критериальных зависимостях, продемонстрирована высокая степень сходимости результатов расчета по формулам и экспериментальных измерений температуры подшипника.

В пятой главе представлены результаты расчетного исследования сопряженного теплообмена опоры компрессора с использованием 3D метода, реализованного в программном комплексе ANSYS. Получено тепловое состояние как конструкции ротора компрессора, так и протекающего в его полостях воздуха.

На основе результатов расчета спроектирована оптимизированная по расходу охлаждающего воздуха геометрия каналов системы охлаждения подшипника, обеспечивающая допустимый температурный режим и работоспособность шарикоподшипника.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном и методическом уровне. Материал излагается в четкой логической последовательности и написан грамотным техническим языком. Приводится большое количество рисунков для пояснения.

Автореферат позволяет в достаточной степени представить основное содержание диссертации.

- **Новизна полученных результатов**

Автором получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

- разработан расчетно-экспериментальный метод проектирования опоры короткоресурсного авиационного ГТД с радиально-упорным шариковым подшипником, смазываемым консистентной смазкой и охлаждаемым воздухом, подаваемым на кольца подшипника. Метод основан на экспериментальном исследовании теплового состояния опоры и прямом замере осевого усилия, действующего на подшипник методом динамического тензометрирования;

- экспериментально определен характер влияния осевой силы и частоты вращения ротора на изменение тепловыделения в подшипнике и на изменение температуры наружного кольца подшипника;

- впервые разработан и реализован способ измерения осевой силы с применением метода динамического тензометрирования, благодаря которому были определены величины суммарных осевых сил ряда двигателей авиационного назначения.

- **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена обоснованностью исходных предположений и гипотез, соответствием теоретических предположений экспериментальным данным; близостью результатов расчетов и данных эксперимента, проведенных на современном оборудовании. Достоверность полученных результатов также подтверждается корректным использованием современного математического аппарата, реализованного в коммерческом программном коде.

- **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

Теоретическая значимость полученных результатов для развития методов проектирования шарикоподшипниковых опор с консистентной смазкой заключается в возможности простой и достаточно точной оценки теплового состояния подшипника с использованием предложенных критериальных зависимостей.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанный расчетно-экспериментальный метод позволяет оптимально распределить потребные расходы охлаждающего воздуха на подшипники качения и на элементы конструкции. Тем самым, снижаются градиенты температур элементов подшипников, улучшается тепловое состояние консистентной смазки и повышается надежность ГТД. Разработанный метод анализа теплового состояния подшипников внедрен в практику работы ПАО «ОДК-Сатурн» г. Рыбинск.

- **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы целесообразно рекомендовать к использованию на предприятиях и в организациях, занимающихся проектированием и доводкой короткоресурсных газотурбинных двигателей таких, как ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа), ПАО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь), ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург), ПК «Салют» (г. Москва) и др.

- **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности**

Содержание диссертации полностью соответствует специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов по пунктам: 6: «Методы конструирования тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем, включая методы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ»; 10: «Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний»; 12: «Методы обеспечения надежности двигателей и энергетических установок летательных аппаратов, эффективности их использования».

- **Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе можно сделать ряд замечаний:

- не представлен алгоритм определения показателей степени в критериальном уравнении коэффициента сопротивления без внешнего теплообмена;

- не приведена количественная оценка погрешности определения параметров теплового состояния подшипника с использованием расчетной методики по сравнению с экспериментом;

- не приведено обоснование некоторых допущений, заложенных в методику 3D-моделирования сопряженного теплообмена опоры компрессора (коэффициент термического сопротивления при передаче тепла в стыке между твердыми телами, коэффициент теплоотдачи в граничных условиях теплообмена полотна третьей ступени со стороны дисковой полости компрессора).

- **Заключение**

Диссертация Храмина Романа Владимировича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи разработки эффективного расчетно-экспериментального метода проектирования опор ГТД с шариковыми подшипниками качения с консистентной смазкой и воздушным охлаждением, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно газотурбинного двигателестроения, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв обсужден на заседании кафедры авиационных двигателей ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» 08.02.2021 г. протокол №7

Отзыв составлен:

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой
авиационных двигателей
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»



Гишваров А.С.
“ 08 ” 02 2021 г.

Докторская диссертация Гишварова Анаса Саидовича защищена по специальности 05.07.05 – Тепловые, ракетные, электроракетные двигатели летательных аппаратов.

д.т.н, профессор,
профессор кафедры авиационных
двигателей ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный
технический университет»



Кривошеев И.А.
“ 08 ” 02 2021 г.

Докторская диссертация Кривошеева Игоря Александровича защищена по специальности 05.07.05 – Тепловые, ракетные, электроракетные двигатели летательных аппаратов.

Адрес организации: 450008, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12

Рабочий телефон: +7908-350-22-92, адрес эл. почты: kafedra.ad@mail.ru

С отзывом ознакомлен 08.02.21 / Р.В. Крашенин /