

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Балякина Валерия Борисовича  
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».

### Актуальность темы диссертационной работы

Подшипники роторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) работают в условиях высоких частот вращения, нагрузок и температур. С развитием авиационных двигателей постоянно совершенствуются их параметры, такие как величина отношения тяги к массе двигателя, удельный расход топлива, стоимость и другие. Для достижения требуемых характеристик двигателей повышаются их термогазодинамические параметры и частоты вращения роторов, а также совершенствуются системы смазки и охлаждения опор роторов.

Для обеспечения работоспособности опор роторов короткоресурсных авиационных ГТД, работающих при высоких скоростях вращения и температурах, перспективным является применение консистентной системы смазки и гибридных подшипников, имеющих лёгкие керамические тела качения и стальные кольца. В связи с этим работа автора, посвященная особенностям проектирования опоры радиально-упорного шарикового подшипника авиационного газотурбинного двигателя с консистентной системой смазки является весьма актуальной.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

Вх. № \_\_\_\_\_  
« 03 » 03 2021 г.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Автором на основании результатов достаточного количества экспериментальных исследований сделаны обоснованные выводы и предложены рекомендации по проектированию подшипниковых опор роторов авиационных ГТД с консистентной смазкой. Разработан расчетно-экспериментальный метод, позволяющий оценивать тепловой режим шарикоподшипников с консистентной смазкой при различных значениях частоты вращения ротора и величине осевой силы.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением экспериментальных исследований на аттестованном в установленном порядке стенде с оценкой погрешности эксперимента; применением классических методов планирования эксперимента и аппроксимации массивов экспериментальных данных; соответствием расчётных значений результатам испытаний.

### **Научная новизна полученных результатов**

Научная новизна заключается в разработке нового расчетно-экспериментального метода проектирования опоры короткоресурсного авиационного ГТД с шариковым подшипником качения с консистентной смазкой и воздушным охлаждением и прогнозирования теплового состояния подшипников качения, обеспечивающего соответствие расчетных значений результатам испытаний. На основании полученного расчётного теплового состояния подшипников предложен метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников качения с учётом их теплового состояния. Автором диссертации разработаны и предложены критерии, по которым можно оценить область рационального использования гибридных подшипников качения. Подтверждены преимущества применения гибридных подшипников

качения при наличии перекоса колец, в условиях консистентной смазки и при прекращении подачи масла.

### **Практическая значимость**

Результаты диссертационной работы имеют практическую значимость, позволяя решить вопросы подбора необходимого расхода воздуха для охлаждения высокооборотных гибридных подшипников с консистентной смазкой. Использование предлагаемого метода на практике позволяет существенно снизить время на проектирование подшипниковых узлов ГТД, обеспечить их работоспособность и, как следствие, повысить надежность и долговечность самих ГТД.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация Храмина Романа Владимировича состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 117 страниц основного текста, 53 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 92 наименования.

**Во введении** автор показывает актуальность работы, раскрывает научную новизну и практическую значимость. Формулирует цель и задачи работы.

**В первой главе** выполнен обзор работ, посвященных исследованию опор роторов ГТД. На основе анализа опубликованных работ отмечено, что современное развитие авиационного двигателестроения постоянно направлено на улучшение конструкций опорных узлов газотурбинных двигателей.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы тепловыделения в подшипниках. Представлен обзор существующих методов оценки тепловыделения в подшипниках общего применения и в высокооборотных авиационных подшипниках. Представлены теоретические предпосылки к

описанию процесса движения смазки в подшипнике без учета внешнего теплоподвода и подвода охлаждающего воздуха.

**В третьей главе** описан способ измерения осевого усилия, действующего на радиально-упорный шарикоподшипник передней опоры ротора ГТД. Для измерения величины осевого усилия, воспринимаемого шарикоподшипником, а также для оценки характера изменения осевого усилия, узел шарикоподшипника дорабатывается под установку в него тензометрических датчиков.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным работам, которые были проведены при разработке методов расчета теплового состояния опор с подшипниками качения и консистентной смазкой в составе газотурбинного двигателя. Экспериментальным работам в составе двигателя предшествовали испытания радиально-упорных шарикоподшипников с шариками из нитрида кремния на специальной установке по исследованию подшипников.

В результате проведенных испытаний был разработан и верифицирован метод расчета теплового состояния подшипников с консистентной смазкой, охлаждаемых воздухом. Эксперименты с подшипниками с керамическими телами качения в составе двигателя подтвердили существенное снижение тепловыделения в них по сравнению со стальными телами качения. Это позволило отказаться от циркуляционной системы смазки

**В пятой главе** был проведен расчет сопряженного теплообмена опоры компрессора исследуемого двигателя, что позволило спроектировать систему охлаждения подшипника (выбрать геометрию каналов и отверстий), а также определить потребный расход воздуха. Выполненные расчетные, а также экспериментальные исследования опоры радиально-упорного шарикового подшипника с консистентной смазкой, как в составе специальной установки, так и в составе двигателя позволили разработать эффективный метод проектирования таких опор на основе предложенного критериального уравнения определения теплового состояния узла опоры.

В **Заключении** приведены основные выводы по результатам диссертационной работы.

### **Замечания**

1. Не приведена относительная погрешность экспериментальных данных, что затрудняет оценку достоверности результатов исследования.
2. Часть графиков не имеет размерностей по осям координат, что позволяет провести лишь качественную оценку результатов данного исследования.
3. Имеются незначительные замечания в оформлении диссертации, так непонятны индексы в формулах 2.15, 2.19 и 2.20.

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**

Диссертация Храмина Романа Владимировича является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. На основе проведенных экспериментальных исследований разработан расчетно-экспериментальный метод, позволяющий оценивать тепловой режим шарикоподшипников с консистентной смазкой при различных значениях частоты вращения ротора и величине осевой силы. 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

