

Министерство образования и науки  
Российской Федерации



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44  
E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)  
ОГРН 1027739051779  
ИНН 7701002520 КПП 770101001

18.11.2019 № 01.03-10/1098

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного совета  
Д 212.125.08 на базе ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)» (МАИ)

доктору технических наук, профессору

Ю.А. Равиковичу

Волоколамское ш., д.4, г. Москва А-80,

ГСП-3, 125993

Тел./факс: +7 (499) 158-29-77

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляем Вам отзыв официального оппонента д.т.н., доц., профессора кафедры «Прикладная механика «ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» Сорокина Фёдора Дмитриевича на диссертацию Лаврентьева Юрия Львовича «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей», 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».

ПРИЛОЖЕНИЕ: Отзыв в 2-х экземплярах на 5 страницах.

Первый проректор –  
проректор по научной работе

В.Н. Зимин

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 2  
20 11 2019

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Сорокина Фёдора Дмитриевича на диссертационную работу Лаврентьева Юрия Львовича «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей», 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»

Гибридные подшипники качения, имеющие стальные кольца и керамические тела качения, активно применяются в опорах высокооборотных изделиях, например, в шпиндельных станках. В последние годы гибридные подшипники стали использоваться, в том числе, в опорах роторов авиационных двигателей. Например, в передней опоре ротора КВД двигателя семейства Lear фирмы CFMI установлен гибридный подшипник. Предполагается использовать гибридные подшипники в разрабатываемых фирмой Rolls-Royce двигателях Advance и Ultrafan.

Использование гибридных подшипников обусловлено повышением физических частот вращения роторов авиационных двигателей. Современные подшипники качения авиационных двигателей работают при параметрах быстроходности до  $d_m n = 3 \dots 3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин ( $d_m$  – средней диаметр подшипника;  $n$  – частота вращения).

С одной стороны, из-за меньшей плотности керамики нагрузка на наружное кольцо гибридного подшипника от центробежных сил тел качения будет меньше, чем в стальном подшипнике. С другой стороны, за счёт высокого модуля упругости керамики контактные напряжения в гибридном подшипнике будут выше, чем в стальном подшипнике. Поэтому можно предположить, что существует рациональная область применения гибридных подшипников качения. Кроме того, стоит ожидать, что стальной и гибридный подшипники будут иметь разное тепловое состояние, зависящее от условий эксплуатации подшипника.

В диссертационной работе предложен метод прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения, а также определена рациональная область использования гибридных подшипников. В связи с изложенным тема диссертации представляется весьма **актуальной**.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 20 / 11 / 2019

Диссертационная работа Лаврентьева Ю.Л. выполнена в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и состоит из введения, шести глав, 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 современному состоянию исследований гибридных подшипников, имеющих керамические тела качения и стальные кольца, для их применения в составе опор авиационных двигателей.

Во второй главе рассмотрен процесс образования тепла в подшипнике. Выделены основные источники тепловыделения. Проведен анализ процессов теплопередачи в подшипниковом узле. Отмечено, что среди роторных подшипников двигателя наиболее критичными с точки зрения обеспечения требуемого теплового состояния являются шариковые радиально-упорные подшипники качения, работающие при высоких частотах вращения и осевых нагрузках. Представлен обзор существующих методов оценки тепловыделения в стальных шариковых радиально-упорных подшипниках качения с многоточечным контактом.

В третьей главе представлена экспериментальная часть работы. Приведено описание стенда, рассмотрены метрологические вопросы, методика и объекты испытаний. По мнению рецензента, третья глава с точки зрения ее значимости является весьма важной, так как полученные в ней результаты используются в последующих главах и могут использоваться в дальнейшем для верификации расчетов подшипниковых узлов другими методами, например, методом конечных элементов. Фотографии тел качения и дорожек качения после испытаний не оставляют никаких сомнений в преимуществах гибридных подшипников при высоких частотах вращения.

В четвертой главе изложен разработанный в диссертации метод прогнозирования теплового состояния подшипников, работающих при высоких частотах вращения, получены эмпирические зависимости тепловыделения и температур колец гибридных и стальных подшипников от режимов работы подшипника. Показано соответствие расчётных значений экспериментальным данным.

В пятой главе представлен метод прогнозирования долговечности шариковых радиально-упорных подшипников с учётом их теплового состояния.

В шестой главе объединены результаты, полученные в предыдущих главах, и предложены критерии, ограничивающие область использования стальных и гибридных подшипников.

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 в области определения тепловыделения в подшипниках качения. Проведен анализ опыта применения гибридных подшипников в составе опор авиационных двигателей. Список использованной литературы содержит 109 наименований. На основе проведенного анализа были спланированы и проведены экспериментальные исследования, по результатам которых автором был разработан расчетный метод прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников.

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, подтверждается соответствием полученных расчетных значений результатам проведенных испытаний и результатам испытаний, представленных в известной литературе.

Достоверность экспериментальных результатов обоснована проведением испытаний подшипников на аттестованном в установленном порядке стенде. Достоверность расчётов обоснована применением классических подходов механики контактного взаимодействия и контактной выносливости (теория Герца, теория Лундберга-Пальмгрена).

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы. Основные положения, выносимые диссертантом для публичной защиты, прошли успешную апробацию в рамках научно-технических конференций российского и международного уровней.

**Новизна** полученных результатов заключается в следующем:

- исследовано тепловое состояние гибридных подшипников при параметрах быстроходности до  $3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин;
- разработан расчетный метод оценки теплового состояния гибридных подшипников качения;
- разработан метод расчёта долговечности гибридных подшипников с учётом теплового состояния;

- предложены критерии, определяющие область рационального применения гибридных подшипников качения;
- подтверждены преимущества использования гибридных подшипников при наличии перекоса, при работе на консистентной смазке и при прекращении подачи масла.

### **Практическая значимость результатов исследований:**

- Разработанный метод определения тепловыделения в гибридных подшипниках качения позволяет подобрать необходимый для охлаждения подшипника расход масла.
- Разработанный метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников позволяет учесть тепловое состояние подшипника, что, в частности, важно при выборе радиального зазора подшипника.
- Предложенные критерии позволяют оценить необходимость применения в опорах роторов гибридных подшипников качения в зависимости от условий эксплуатации.

### **В качестве замечаний и недостатков диссертации следует отметить:**

1. В диссертации собрана и обобщена очень большая информация о расчетах тепловых режимов и долговечности подшипников авиационных двигателей, которая представлена в основном эмпирическими и полуэмпирическими соотношениями. По мнению рецензента, некоторые из расчетов, например, решение контактной задачи можно было выполнить современным расчетным методом конечных элементов с использованием распространенных программных продуктов, таких как ANSYS, NASTRAN, COMSOL и других.

2. При построении регрессионных соотношений вычисляются логарифмы размерных чисел. Хотя такое положение дел довольно часто встречается в литературе, более корректно было бы обезразмерить все параметры и только потом вычислять логарифмы.

3. Большое количество формул, собранных из разных литературных источников, привело к тому, что одни и те же величины измеряются в разных единицах. Например, для сил используются Н и кгс, для напряжений МПа и кгс/мм<sup>2</sup>. В одной научной работе хотелось бы видеть одинаковые единицы измерения.

4. Выводы по первой главе отличаются от выводов по остальным главам большим объемом (12 выводов). Фактически эти выводы являются кратким пересказом первой главы.

5. В тексте диссертации встречаются повторы и опечатки в формулах, количество которых незначительно.

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 Лаврентьева Юрия Львовича является завершённой и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой. Автором решена важная научная задача прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения, имеющая существенное значение при создании перспективных высокооборотных ТРДД. 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, и её автор, Лаврентьев Юрий Львович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

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



Ф.Д. Сорокин

« 18 » ноября 2019 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.Т. МАТВЕЕВ  
НАЧ. УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
ТЕЛ. 8499-263-67-69