

Госкорпорация «Роскосмос»  
Акционерное общество  
«НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»  
(АО «НПО Энергомаш»)

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЕНЕРАЛЬНОГО  
ДИРЕКТОРА – ГЛАВНЫЙ КОНСТРУКТОР**

Бурденко ул., д. 1, г. Химки, Московская область, 141400  
Тел.: (495) 286-91-13; Факс: (495) 286-91-36; (495) 286-91-37  
E-mail: energo@npoem.ru; http://www.engine.space  
ОКПО 07557935; ОГРН 1025006169704  
ИНН/КПП 5047008220/509950001

от 15.11.2019г. № 502/1780

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Об отзыве на диссертационную  
работу


Председателю диссертационного  
совета  
Д 212.125.08 на базе Московского  
авиационного института  
(национального исследовательского  
университета)  
доктору технических наук,  
профессору

Равиковичу Ю.А.

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляем Вам отзыв ведущей организации 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».

ПРИЛОЖЕНИЕ: Отзыв в 2-х экз на 7 л каждый.

*С уважением,*  
 П.С. Левочкин

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Заместитель генерального директора –

Главный конструктор,

кандидат техн. наук

П.С. Левочкин

« 15 » 11 2019 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Лаврентьева Юрия Львовича

«Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

По оценкам специалистов в перспективных двигателях летательных аппаратов подшипники опор роторов будут работать при значениях параметра быстроходности  $d_{мп}=3...4 \cdot 10^6$  мм·об/мин. Вместе тем постоянно повышаются требования к надёжности опор роторов, поэтому разрабатываемые конструкции, методики и подходы должны быть направлены на обеспечение работоспособности и ресурса подшипников в условиях высоких частот вращения.

В отечественной практике имеется опыт эксплуатации подшипников качения со стальными кольцами и телами качения в водородных турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей при высоких значениях коэффициента быстроходности до  $d_{мп} \sim 3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин. Для стальных подшипников роторов газотурбинных авиационных двигателей (ГТД) подобный опыт отсутствует. Для охлаждения стальных подшипников ГТД может потребоваться большой расход масла. Перспективным является применение гибридных подшипников качения, имеющих стальные кольца и керамические тела качения. Из-за меньшей плотности керамики (обычно нитрида кремния) нагрузка на наружное кольцо гибридного подшипника от центробежных сил тел качения существенно меньше, чем в подшипнике со стальными телами качения. Кроме этого, размеры керамических тел качения из-за более низкого чем у стали значения коэффициента линейного теплового расширения материала при повышении температуры увеличиваются незначительно, что позволяет уменьшить номинальный радиальный зазор в подшипнике и

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 19-77 2019



обеспечить большую жесткость опор и низкие вибрации ротора в эксплуатации. С другой стороны, за счёт высокого модуля упругости керамики в гибридном подшипнике будут иметь место более высокие контактные напряжения, чем в стальном подшипнике. Тем не менее существует рациональная область применения гибридных подшипников качения в опорах роторов. Все это делает работу, направленную разработку методик расчета гибридных подшипников авиационных ГТД актуальной.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые в отечественной практике исследовано тепловое состояние гибридных подшипников качения с внутренними диаметрами 130 и 150 мм при высоких значениях параметра быстроходности,  $d_{мп}$  до  $3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин.

2. На основании результатов испытаний разработан расчетный метод прогнозирования теплового состояния гибридных подшипников качения, обеспечивающий хорошую сходимость с экспериментальными данными.

3. Разработан метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников качения с учётом их теплового состояния.

4. Предложены критерии, определяющие область рационального применения гибридных подшипников качения в опорах авиационных ГТД.

5. На основании сравнительных исследований гибридных и стальных подшипников качения с внутренним диаметром 30 мм впервые в отечественной практике подтверждены преимущества использования гибридных подшипников с кольцами из стали ЭИ347 в особых условиях эксплуатации: при наличии перекоса колец, в условиях консистентной смазки, при прекращении подачи масла.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что:

1. Разработанный метод определения тепловыделения в гибридных подшипниках качения позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований и ускорить разработку подшипниковых узлов, в частности подобрать необходимый расход масла.

2. Разработанный метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников позволяет учесть тепловое состояние подшипника, что практически важно для выбора величин радиального зазора подшипника и натяга внутреннего кольца подшипника на вал.

### **Достоверность результатов обоснована:**

- применением классических подходов механики контактного взаимодействия;
- проведением экспериментальных исследований на аттестованном в установленном порядке стенде;
- соответствием расчётных значений результатам испытаний.

### **Общие сведения о диссертационной работе**

Диссертационная работа Лаврентьева Ю.Л. состоит из введения, шести глав, основных выводов и списка литературы. Общий объём диссертационной работы составляет 134 страниц основного текста, 69 рисунков, 20 таблиц и 1 приложение. Список литературы включает 109 наименований.

**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. Указаны преимущества и проблемы применения подшипников с телами качения из керамических материалов. Представлены результаты сравнительных усталостных испытаний керамических и стальных тел качения, а также сравнительных испытаний гибридных и стальных подшипников. Рассмотрены существующие методы оценки долговечности гибридных подшипников. Проведен обзор работ, посвященных исследованию тепловыделения в гибридных подшипниках.

**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 отечественных и зарубежных методов оценки тепловыделения в стальных шариковых радиально-упорных подшипниках качения с многоточечным контактом. Указаны ограничения существующих методов.



**В третьей главе** представлена экспериментальная часть работы. Приведено описание стенда, рассмотрены метрологические вопросы, представлено планирование эксперимента. Представлены результаты экспериментальных исследований подшипников с внутренними диаметрами 130 и 150 мм. Дополнительно представлены результаты исследования подшипников с внутренним диаметром 30 мм в особых условиях эксплуатации: при наличии перекоса, в условиях консистентной смазки и при прекращении подачи масла к подшипнику.

**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. Проведены сравнения расчётных значений с экспериментальными данными ЦИАМ и с экспериментальными данными, представленными в литературе. Отмечено, что разработанный метод определения тепловыделения позволяет получить приемлемые результаты и может быть использован при проектировании и расчёте теплового состояния авиационных подшипников.

**В пятой главе** представлен метод прогнозирования долговечности шариковых радиально-упорных подшипников с учётом их теплового состояния. Представлены основные отличия разработанного метода от существующих: температуры колец рассчитываются по разработанному методу прогнозирования теплового состояния подшипников; расчёт радиального зазора проводится на каждом этапе его изменения; расчёт эквивалентной нагрузки проводится с учётом действительного распределения нагрузки по телам качения в зависимости от вида действующих на подшипник нагрузок: только осевая, только радиальная, комбинированная. Представлены примеры расчетов гибридных и стальных подшипников с внутренним диаметром 130 мм при различном тепловом состоянии.

**В шестой главе** объединены результаты, полученные в главах 4 и 5, и предложены критерии, ограничивающие область использования стальных и гибридных подшипников:

- уровень максимальных контактных напряжений на наиболее нагруженном режиме не выше допустимого уровня;
- удовлетворение требованиям ресурса с учетом коэффициента запаса;
- допустимый уровень частоты вращения ротора;
- нагрузка на подшипник не ниже минимально допустимого уровня.

На примере подшипника с внутренним диаметром 130 мм показана область рационального использования гибридных подшипников.

### **Рекомендации по использованию диссертации**

Результаты диссертационной работы имеют практическую ценность для предприятий, занимающихся созданием роторных машин, в первую очередь в авиационной промышленности. Методы прогнозирования теплового состояния гибридных и стальных подшипников могут быть применены для определения необходимого расхода охлаждающей жидкости – масла, конструктивного исполнения перспективных быстроходных изделий с параметрами быстроходности подшипников до  $3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин. Предложенный метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников может быть применен для оптимизации внутренней геометрии подшипников, расчета посадок подшипников на вал. Предложенный подход к определению рациональной области использования гибридных подшипников может быть применен на этапе выпуска технического предложения и эскизного проекта для определения типа используемого подшипника. Результаты диссертационной работы можно использовать на предприятиях, занимающихся расчетом и проектированием высокооборотных роторных машин различного назначения, опоры которых охлаждаются маслом, таких как АО «ОДК-Сатурн», АО «ОДК-Авиадвигатель», АО «ОДК-Кузнецов», ОКБ им. А. Льюльки и др.

### **Замечания по содержанию диссертации**

Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа не лишена недостатков, к которым можно отнести следующие:

1. При проведении анализа использования гибридных подшипников с коэффициентом быстроходности более  $3,5 \cdot 10^6$  мм·об/мин желательно было бы рассмотреть опыт их применения в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей, например SSME, РД0146, VINCI и др.

2. В работе не рассмотрено влияние перехода критических частот вращения ротора на долговечность подшипника, что важно, учитывая меньшую, по сравнению со сталями, стойкость керамики к вибрационным и ударным нагрузкам в сочетании с большими контактными напряжениями из-за более высокой твердости.

3. Хотелось бы увидеть более четкие рекомендации по назначению посадок на вал и в корпус гибридных подшипников качения с учетом применяемых в настоящее время сталей и керамических материалов.

4. На листе 26 использован некорректный термин «пограничное смазывание», есть термины «границная смазка» или «режим граничной смазки».



5. На графиках следовало бы указать исполнение подшипника.
6. Для подшипника диаметром 130 не приведены входные и выходные температуры масла.
7. Для подшипника диаметром 150 не указано как центрировался сепаратор.
8. Автором не приведена оценка погрешности полученных результатов испытаний.
9. Несмотря на достаточно высокое качество изложения в работе встречаются отдельные грамматические и стилистические ошибки.

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы и не влияют на ее основные результаты.

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

Диссертация Лаврентьева Ю.Л. является научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов и решений технических задач по разработке метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей. Цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации автора полно отражают содержание, выводы и результаты работы.

Диссертация соответствует всем критериям, приведенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а 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».

При проведении дальнейших исследований рекомендуется рассмотреть вопросы влияния на работоспособность гибридных подшипников качения дефектов материала, точности изготовления тел качения и колец подшипника, влияние твердости дорожек качения колец подшипников на тепловое состояние и долговечность подшипника, влияние осевых сил на роторе, возникающих на режимах, отличных от номинального, на долговечность и тепловыделение в гибридном подшипнике.

Отзыв на диссертационную работа Лаврентьева Ю.Л. обсужден и одобрен на расширенном заседании специалистов отдела агрегатов ЖРД Конструкторского бюро АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», протокол № 010/011 от 15.11.2019 г.

Зам. главного конструктора по  
новым технологиям, д.т.н.



А.В. Иванов

Начальник сектора турбин



А.С. Сидоренко

Акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

141400, Россия, Московская область, г. Химки, ул. Бурденко, д.1

+7 (495) 286-91-13

energo@npom.ru