



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОДК-КЛИМОВ»  
(АО «ОДК-КЛИМОВ»)

19.11.2019 № К-430/653/684  
На № 08-2019-13 от 30.09.2019

Отзыв на автореферат  
диссертации Лаврентьева Ю. Л.

Учёному секретарю  
диссертационного совета  
Д 212.125.08  
при Московском авиационном институте  
(национальном исследовательском  
университете) (МАИ)  
профессору, д.т.н.  
**Зуеву Ю. В.**  
Волокаламское шоссе, 4. МАИ, Учёный совет  
г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993  
e-mail: mai@mai.ru

### Уважаемый Юрий Владимирович!

Направляю Отзыв на автореферат диссертации Лаврентьева Юрия Львовича «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: указанный Отзыв (подлинник, в 2-х экземплярах) –  
на 12 листах

С уважением,  
Генеральный конструктор

Григорьев А. В.

Исполнитель: Чернявский А. С., тел. +7 (812) 647-00-37 доб. 7742

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 2  
26 11 2019



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ОДК-КЛИМОВ»  
(АО «ОДК-КЛИМОВ»)

## ОТЗЫВ

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

В автореферате диссертации Лаврентьева Юрия Львовича «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей» представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований, направленных на применение гибридных подшипников (ГП) опор роторов авиационных ГТД.

ГП имеют стальные кольца и керамические тела качения. Они имеют ряд преимуществ, по сравнению со стальными подшипниками:

- повышенная работоспособность при больших частотах вращения (повышенных окружных скоростях);
- повышенные максимально допустимые рабочие температуры;
- уменьшенная теплоотдача требует меньшей прокачки масла, что упрощает решение вопроса охлаждения масла и способствует созданию автономной масляной системы.

Применение ГП особенно актуально для высокоскоростных роторов перспективных ГТД.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАК  
Дх. №         
26 11 2019



Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка авторских публикаций.

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

**В первой главе** выполнен обзор работ, посвящённых современному состоянию исследований ГП, имеющих керамические тела качения и стальные кольца, указаны преимущества и проблемы их применения в опорах авиационных двигателей. Представлены результаты сравнительных испытаний керамических и стальных тел качения, а также гибридных и стальных подшипников в целом. Рассмотрены существующие методы оценки долговечности ГП. Выполнен обзор работ, посвящённых исследованию тепловыделения в ГП.

Отмечена необходимость совершенствования методов определения теплового состояния подшипников и разработки критериев, определяющих область рационального применения ГП.

**Во второй главе** рассмотрены процессы образования тепла в подшипнике. Выделены основные источники тепловыделения. Проведён анализ процессов теплопередачи в подшипниковом узле. Отмечено, что среди роторных подшипников 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. Рассмотрены методы определения тепловыделения в подшипниках, работающих при малых частотах вращения. Представлены методы расчёта тепловыделения в подшипниках, работающих при обильной подаче масла.

Область применения перечисленных методов ограничена. Для ГП методы определения тепловыделения представлены только для малых частот вращения.

В известной литературе нет зависимостей, позволяющих оценить температуру колец ГП.

**В третьей главе** представлена экспериментальная часть работы. Приведено описание стенда, рассмотрены метрологические вопросы, методика и объекты испытаний.

Задача сводилась к получению по результатам экспериментальных исследований эмпирических зависимостей тепловыделения и температуры колец от ряда геометрических и эксплуатационных параметров. С целью определения преимуществ ГП проводились сравнительные испытания стальных подшипников.

С целью получения информации о тепловом состоянии подшипников в ОУЭ испытания проводились по методу полнофактурного эксперимента.

**В четвёртой 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 режима работы. Приведено сравнение расчётных значений с экспериментальными данными ЦИАМ и с экспериментальными данными, представленными в литературе (КАИ, NASA, MTU, AFRL, NSK и др.). Проведено сравнение расчётных значений, полученных с помощью разработанного метода со значениями, полученными с использованием других известных методов.

**В пятой главе** представлен метод прогнозирования долговечности шариковых радиально-упорных подшипников с учётом их теплового состояния. Расчёт выполнен в программном комплексе Matlab и включает в себя 3 модуля:

- первый учитывает изменение зазора;
- второй рассчитывает эквивалентную нагрузку;
- третий рассчитывает номинальную и модифицированную долговечность.

Основные отличия от существующих методов:

- температура колец рассчитывается по разработанному методу прогнозирования теплового состояния подшипника;



- расчёт радиального зазора проводится на каждом этапе его измерения;
- расчёт эквивалентной нагрузки проводится с учётом действительного распределения нагрузки по телам качения в зависимости от вида действующих нагрузок.

Разработанные эмпирические формулы позволяют определить температуру колец в зависимости от режима их эксплуатации.

Из представленных результатов видно, что для использования стальных подшипников при высоких частотах вращения, для обеспечения работоспособности, необходимо увеличивать радиальный зазор.

В ГП радиальный зазор сохраняется в более широком диапазоне частот вращения, что обеспечивает меньшие величины эквивалентной нагрузки, контактных напряжений и большую долговечность.

**В шестой главе** объединены результаты, полученные в предыдущих главах и предложены критерии, ограничивающие область использования стальных подшипников и ГП:

1. Уровень максимальных контактных напряжений на наиболее нагруженном режиме.
2. Назначенный ресурс.
3. Ограничение частоты вращения.
4. Минимально допустимая нагрузка.

Построены границы областей применения стальных подшипников и ГП.

**В заключении** приведены основные выводы по диссертационной работе, которые охватывают поставленные задачи.

Текст автореферата изложен ясно и четко, исследуемые проблемы глубоко проработаны. При благоприятном впечатлении в целом по материалу, представленному в автореферате, необходимо сделать следующие замечания:

1. Представляет интерес рассмотрение конструктивных и технологических мероприятий влияющих на характеристики подшипников:

- различные материалы наружного и внутреннего колец, их термообработка;

- различные материалы тел качения;
- различные материалы сепараторов и их покрытия.

2. Представляет интерес сравнение характеристик ГП при вращающихся внутренних или наружных кольцах.

3. Представляет интерес сравнение характеристик межвальных ГП при одинаковом или противоположном направлении вращении роторов.

4. Представляет интерес улучшение характеристик подшипников и масляной системы в целом при применении электроприводных масляных насосов. Оптимизация прокачки масла на различных режимах работы, устранение сухого трения при запуске и останове.

5. Представляет интерес оптимизация характеристик применяемых масел при сравнении работы ГП и стальных подшипников. Отдельный интерес представляет применение ГП в ГТД ЛА предназначенных для длительного полёта с высокими скоростями ( $M_{п} > 3$ ), где применение масел на углеводородной основе проблематично. Например можно рассмотреть применение компаундов на силиконовой основе.

6. Для малоразмерных быстроходных роторов при отсутствии реакции от зубчатых передач (привод редуктора, коробки приводов агрегатов) оптимальным конструктивным решением является применение газодинамических подшипников и отсутствие при этом масляной системы. К данному типу относятся также и ротора ТНА ЖРД.

Несмотря на указанные замечания, работа заслуживает положительной оценки. Анализ содержания автореферата диссертации, основных защищаемых положений, результатов и выводов, позволяет сделать заключение о том, что диссертационная работа Лаврентьева Юрия Львовича «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9 «Положения о присуждении

ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Лаврентьев Юрий Львович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Рецензенты:

Генеральный конструктор, к.т.н.



Григорьев

Алексей Владимирович

Ведущий инженер-конструктор

49

Чернявский

Александр Самуилович

Подписи рецензентов

(их ф.и.о., ученые степени, должности)

Заверяю:

Начальник отдела научных программ-

Секретарь НТС

Е.Ю.Орлова

М.П.