

## СВЕДЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.08

**Соискатель:** Лаврентьев Юрий Львович

**Тема диссертации:** Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей

**Специальность:** 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:** На заседании 9 декабря 2019 года диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присудить Лаврентьеву Юрию Львовичу ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** и.о. председателя диссертационного совета Назаренко И.П., ученый секретарь диссертационного совета Зуев Ю.В., члены диссертационного совета: Абашев В.М., Демидов А.С., Козлов А.А., Коротеев А.А., Кочетков Ю.М., Краев В.М., Кулешов Н.В., Марчуков Е.Ю., Молчанов А.М., Мякочин А.С., Надирадзе А.Б., Ненарокомов А.В., Никитин П.В., Попов Г.А., Силуянова М.В., Тазетдинов Р.Г., Тимушев С.Ф., Хартов С.А., Чванов В.К.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.08, д.т.н., профессор

Ю.В. Зуев

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.08,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 09.12.2019 № 29

О присуждении Лаврентьеву Юрию Львовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка метода прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей» по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» принята к защите 30.09.2019 г. (протокол № 13) диссертационным советом Д 212.125.08, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказ Минобрнауки РФ о создании диссертационного совета – №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Лаврентьев Юрий Львович, 1989 г. рождения, работает ведущим инженером в государственном научном центре Российской Федерации, Федеральном государственном унитарном предприятии

«Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»  
Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

В 2012 г. соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». В 2019 году окончил аспирантуру федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова».

Диссертация выполнена в исследовательском центре «Динамика, прочность, надежность» федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук Ножницкий Юрий Александрович, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность».

Официальные оппоненты:

- Балякин Валерий Борисович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра «Основы конструирования машин», заведующий кафедрой;
- Сорокин Фёдор Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Прикладная механика», профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», г. Химки, в своем положительном отзыве, подписанном Ивановым Александром Владимировичем, доктором технических наук, заместителем главного конструктора по новым технологиям и утвержденном Левочкиным Петром Сергеевичем, кандидатом технических наук, заместителем генерального директора - главным конструктором, указала, что диссертация Лаврентьева Юрия Львовича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Автором решена важная научная задача, имеющая практическую значимость для отрасли авиационного двигателестроения. Разработанный метод определения тепловыделения в гибридных подшипниках качения позволяет значительно сократить объём экспериментальных исследований и ускорить разработку подшипниковых узлов, в частности подобрать необходимый расход масла, а 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. Предложенный подход к определению рациональной области использования гибридных подшипников может быть применен на этапе технического предложения и эскизного проекта для определения типа используемого подшипника. Работа отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Лаврентьев Юрий Львович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, все по теме диссертации, общим объемом 6,4 п.л., из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы. Из 14 публикаций: 5 – статьи в научных журналах, 9 – тезисы докладов на научно-технических конгрессах и конференциях; 13 работ написаны в соавторстве.

Эти публикации посвящены исследованию работы гибридных подшипников качения при их использовании в составе опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей. В них приводятся результаты испытаний гибридных подшипников на подшипниковых стендах ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», обобщение которых позволило разработать метод прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения, работающих при высоких частотах вращения, а также определить область рационального применения гибридных подшипников качения в составе опор авиационных двигателей. Две статьи имеют обзорный характер. Первая из них посвящена опыту применения гибридных подшипников качения в составе опор авиационных двигателей, а вторая – обзору существующих методов расчета тепловыделения в шариковых радиально-упорных подшипниках качения.

Авторский вклад в опубликованные статьи заключается в проведении обширного обзора по опыту применения гибридных подшипников и по существующим в настоящее время методам расчета тепловыделения, а также в разработке метода оценки долговечности гибридных подшипников с учётом их теплового состояния, в разработке регрессионных зависимостей тепловыделения и температур колец гибридных подшипников от условий их эксплуатации, в планировании ряда испытаний и обработке результатов испытаний.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые работы:

1. Petrov N.I., Lavrentyev Yu.L. Empirical correlation of heat generation in ball bearings depending on the operational conditions in the supports of aero-engine rotor // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 489. 012029.
2. Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Пути повышения надёжности и ресурса подшипниковых опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т.14, №3, Ч.1. С. 228 – 237.
3. Лаврентьев Ю.Л. Определение оптимальной области применения гибридных подшипников качения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 1. С. 57 – 65.
4. Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Сравнение различных методов расчета тепловыделения в шариковых радиально-упорных подшипниках качения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. №2. С. 154 – 163.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук, профессора Балякина В.Б. содержит замечания:**

1. Разработанный метод прогнозирования теплового состояния представлен не в критериальной форме, что затрудняет его применение для всех размеров гибридных подшипников.
2. Не приведена относительная погрешность аппроксимации экспериментальных данных, что затрудняет оценку достоверности результатов исследования.
3. Имеются незначительные замечания в оформлении диссертации, так после номера рисунка стоят точки вместо тире, а в конце подрисовочных подписей встречаются точки, например, рисунки 4.6, 5.2, 5.3...

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук, доцента Сорокина Ф.Д. содержит замечания:**

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.

**Отзыв на диссертацию ведущей организации акционерного общества «Научно-производственное объединение Энергомаш имени академика В.П. Глушко» содержит замечания:**

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

**Отзыв на автореферат диссертации Баранова В.В.**, кандидата технических наук, ведущего конструктора расчетно-конструкторского отдела публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Аэросила» содержит замечания:

1. На стр. 8 в формуле (2) нагрузка указана в [кгс], а в других местах автореферата в [Н] и [кН];



2. На стр. 10 в качестве единицы измерения плотности масла указана  $\text{г/см}^3$ , что не соответствует системе СИ;
3. В автореферате не представлены значения полученных коэффициентов в формулах 7, 8 и 9.

**Отзыв на автореферат диссертации Шмотина Ю.Н.**, доктора технических наук, заместителя генерального директора – генерального конструктора акционерного общества «ОДК» замечаний не содержит.

**Отзыв на автореферат диссертации Дудьева Д.Я.**, главного конструктора филиала публичного акционерного общества «ОДК-Сатурн» – ОМКБ замечаний не содержит.

**Отзыв на автореферат диссертации Гладкого И.Л.**, кандидата технических наук, начальника отдела акционерного общества «ОДК-Авиадвигатель» содержит следующие замечания:

1. Не указано, можно ли применять разработанные зависимости для подшипников с внутренним диаметром более 150 мм;
2. Не рассмотрены вопросы влияния на работоспособность гибридных подшипников дефектов материала и точности изготовления тел качения.

**Отзыв на автореферат диссертации Суворова А.В.**, кандидата технических наук, первого заместителя главного конструктора акционерного общества «Производственно-конструкторское объединение «Теплообменник» содержит следующие замечания:

1. В автореферате не указана область применения полученных эмпирических зависимостей. В частности, не ясно можно ли использовать полученные зависимости для подшипников малогабаритных турбокомпрессоров и турбогенераторов.
2. На стр.15 – 18 автореферата представлены сравнительные расчёты стального и гибридного подшипников. При этом не указано,

отличалась ли внутренняя геометрия сравниваемых подшипников. Представляется, что гибридный подшипник должен иметь внутреннюю геометрию отличную от стального подшипника.

**Отзыв на автореферат диссертации Киселева А.М.**, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника, ведущего конструктора отдела 3000 Опытно-конструкторского бюро им. А. Люльки – филиала публичного акционерного общества «УМПО» содержит следующие замечания:

1. В автореферате отсутствуют данные об объемах выборок экспериментальных исследований, по которым получены количественные оценки;
2. Для подтверждения ресурса гибридных подшипников в условиях высоких частот вращения целесообразно было бы провести длительные испытания на стендах.

**Отзыв на автореферат диссертации Григорьева А.В.**, кандидата технических наук, генерального конструктора акционерного общества «ОДК-Климов» содержит 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 гибридных подшипников при вращающихся внутренних или наружных кольцах.
3. Представляет интерес сравнение характеристик межвальных гибридных подшипников при одинаковом или противоположном направлении вращения 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 гибридных и стальных подшипников. Отдельный интерес представляет применение гибридных подшипников в ГТД ЛА, предназначенных для длительного полета с высокими скоростями ( $M_{п} > 3$ ), где применение масле 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 ТНД ЖРД.

**Отзыв на автореферат диссертации Кикотя Н.В.,** кандидата технических наук, начальника конструкторского отдела перспективных разработок и экспериментальных исследований газотурбинных двигателей публичного акционерного общества «ОДК-Сатурн» содержит следующие замечания.

1. В автореферате не представлены полученные коэффициенты эмпирических зависимостей.
2. Не указаны параметры внутренней геометрии стального и гибридного подшипников, сравниваемых на стр.16 – 18.
3. Не рассмотрены влияние на долговечность гибридных подшипников возможного наличия дефектов материала и расчёт по методике ISO 16281.

**Отзыв на автореферат диссертации Жильникова Е.П.**, кандидата технических наук, профессора, главного специалиста по надежности подшипников открытого акционерного общества «Управляющая компания ЕПК» содержит следующие замечания:

1. В качестве замечания по тексту реферата следует отметить недостаточное количество данных о характеристиках масел, применяемых в экспериментах и отсутствие описания подачи смазки к испытываемым подшипникам.

**Отзыв на автореферат диссертации Горелова Ю.Г.**, кандидата технических наук, заместителя начальника отдела прочности и тепломассообмена производственного комплекса «Салют» акционерного общества «ОДК» содержит следующие замечания:

1. Повышение жесткости в гибридных подшипниках однозначно не ведет к низким вибрациям ротора в эксплуатации. Это зависит от свойства системы в целом. Повышение жесткости в контакте может привести к повышенным внутренним динамическим нагрузкам на элементы подшипника (о чем косвенно свидетельствует более высокий уровень измеряемых вибраций на гибридном подшипнике по сравнению со стальным).

2. Так как диаметр тел качения значительно меньше, чем диаметры колец, то влияние на радиальный зазор низкого коэффициента линейного расширения керамики незначительно. Пренебрегать силой трения/тепловыделения в контакте сепаратора и кольца нельзя, особенно в условиях работы радиально-упорного подшипника с перекосом.

3. Допущение о ламинарном потоке для оценки конвективного теплообмена при высоких  $DxN > 2 \dots 3 \epsilon b$  выглядит не особо обоснованным. Некорректным выглядит применение зависимости по теплоотдаче для плоской пластины. Более удачным представляется использование

зависимости В.К. Шукина (КАИ) для теплоотдачи при течении жидкости через кольцевой канал с внутренним вращающимся цилиндром и в зазоре между внешним неподвижным и внутренним вращающимся цилиндром. Не указано покрытие на сепараторах испытуемых 126-х подшипников. Отсутствуют пояснения, каким образом был реализован перекоп при испытаниях подшипника 126206. Из эксплуатации 176130 и 126130 известно, что перекоп явно приводит к увеличению нагрузки на сепаратор и, как следствие, к увеличению температуры наружного кольца. При пятикратном отключении подачи масла в течении 60 сек. температура наружного кольца гибридного подшипника практически не изменяется, при этом температура стального подшипника увеличивается на 40-50 градусов только перед заклиниванием. Очевидно, что при отключении масла на входе в установку, масло продолжает омывать как гибридный, так и стальной подшипники в течение – 55 секунд. Не совсем понятным является отсутствие замера температуры внутреннего кольца подшипника быстрее реагирующего на отключение масла и замера температуры масла на выходе из подшипника. Рекомендуется в дальнейшем определить время заклинивание гибридного подшипника при замере температуры внутреннего кольца и температуры масла на выходе из него.

4. На стр. 104 – ошибка в формуле вычисления долговечности: отношение напряжений – в степени 9. На практике в авиационной промышленности (вывод 3 на странице 112) уже давно применяется цементируемая теплостойкая сталь ВКС-4 (перспективным сплав ВКС-10). В Главе 6 к критериям оценки рекомендуется добавить несущую способность гибридного подшипника при помпаже, обрыве части лопатки, влияние на надежность подшипника условий монтажа, его повреждение при транспортировке двигателя.

5. Предпочтительным местом использования гибридного подшипника предполагается каскад высокого давления, где сама по себе тепловая нагрузка

(даже при теплоизоляции в опоре КВД на стенках коксуется масло) на опору намного превышает тепло, генерируемое в подшипнике. Некорректно не учитывать это, а также то, что имеет место в 3-4 раза больший, чем номинальный внешний тепловой поток к подшипнику при (аварийном) останове двигателя, когда тепло от дисков, корпусов передается к корпусу маслополосности и соответственно к подшипнику. Поэтому предложенная методика необходима, но является небольшой частью проектной работы. Не освещена перспектива использования роликовых гибридных подшипников. К сожалению, в работе отсутствует сравнение полученных экспериментальных зависимостей с литературными данными, например, с данными GE из [13] для гибридного подшипника с близким к исследуемому внутренним диаметром – 120 мм и параметром быстроходности –  $DN \leq 3 \times 10^6$  мм·об/мин.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в отрасли наук, к которой относится диссертационная работа Лаврентьева Юрия Львовича, что подтверждается их научными публикациями в международных и отечественных рецензируемых изданиях по тематике исследования.

Выбор Балякина В.Б., доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Основы конструирования машин» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве официального оппонента обосновывается его широкой известностью в вопросах расчета и экспериментальных исследований подшипников опор роторов авиационных двигателей. Балякин В.Б. является соавтором широко известной в отрасли монографии «Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД», в которой обобщены результаты многолетних теоретических и экспериментальных работ в области опор роторов авиационных газотурбинных двигателей с подшипниками качения. За последние 5 лет Балякиным В.Б. в рецензируемых международных и отечественных журналах было опубликовано более 10 статей по профилю

диссертации; основные направления исследований: расчет долговечности подшипников с учетом износа, расчет моментных характеристик подшипников, учёт перекоса колец, модификация поверхности деталей из карбида кремния лазерным воздействием и др.

Выбор Сорокина Ф.Д., доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Прикладная механика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» в качестве официального оппонента обосновывается тем, что он является известным специалистом в области математического моделирования подшипников качения. Предложенная Сорокиным Ф.Д. энергетическая модель роликового подшипника позволяет существенно проще, чем альтернативные методы, определять упругие реакции и жесткости подшипника. За последние 5 лет Сорокин Ф.Д. опубликовал 8 статей в рецензируемых журналах по профилю диссертации.

Выбор ведущей организации – акционерного общества «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» обусловлен её высоким уровнем достижений в области разработки высокооборотных турбонасосных агрегатов ЖРД, подшипники которых работают при высоких параметрах быстроходности. Накопленный опыт и соответствующие компетенции позволяют специалистам предприятия, в частности подписавшим отзыв ведущей организации, оценить актуальность и научную новизну диссертации, а также сформировать рекомендации по практическому использованию результатов диссертаций для предприятий отрасли, занимающихся расчетом и проектированием высокооборотных роторных машин различного назначения, опоры которых охлаждаются маслом. Специалисты ведущей организации, д.т.н. А.В. Иванов, А.С. Сидоренко, Ю.И. Каналин и др., обладают большим опытом в разработке и математическом моделировании высокооборотных турбонасосных агрегатов ЖРД с подшипниками качения, о чем говорят их публикации в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** метод прогнозирования теплового состояния и долговечности гибридных подшипников качения опор быстроходных роторов авиационных газотурбинных двигателей;

**предложены** критерии, определяющие область применения гибридных подшипников качения;

**доказаны** преимущества использования гибридных подшипников в особых условиях эксплуатации: при наличии перекоса колец, в условиях консистентной смазки, при прекращении подачи масла.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**применительно к проблематике диссертации** предложена зависимость для определения контактных напряжений в гибридном подшипнике;

**изложены** результаты аналитического исследования долговечности гибридного подшипника в зависимости от величин температур его колец;

**изучены** факторы, влияющие на тепловое состояние гибридных подшипников.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**показано,** что разработанный метод прогнозирования теплового состояния гибридных подшипников качения позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований и ускорить разработку подшипниковых узлов, в частности, подобрать необходимый расход масла;

**предложен** метод прогнозирования долговечности гибридных подшипников качения, учитывающий тепловое состояние подшипника,



что практически важно для выбора величин радиального зазора подшипника и натяга внутреннего кольца подшипника на вал;

**установлена** область применения гибридных подшипников качения в зависимости от условий эксплуатации;

**результаты работы используются** в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» при расчете подшипников качения опор быстроходных роторов перспективных двигателей.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**достоверность** экспериментальных исследований, подтверждаемую проведением испытаний на аттестованном в установленном порядке стенде;

**соответствие** расчётных значений тепловыделения в подшипнике и температур колец, полученных по регрессионным зависимостям на основании полного факторного эксперимента, результатам испытаний, представленным в литературе.

#### **Личный вклад автора состоит в:**

- выборе критериев, определяющих область использования гибридных подшипников в опорах авиационных двигателей;
- разработке метода оценки долговечности гибридных подшипников с учётом их теплового состояния;
- разработке регрессионных зависимостей тепловыделения и температур колец гибридных подшипников от условий их эксплуатации;
- планировании ряда испытаний подшипников;
- обработке результатов испытаний.

На заседании 09 декабря 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Лаврентьеву Юрию Львовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 8 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

И.о. председателя  
диссертационного совета  
Д 212.125.08

доктор техн. наук, профессор



Назаренко Игорь Петрович

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.08

доктор техн. наук, профессор



Зуев Юрий Владимирович

09 декабря 2019 г.

