

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.08

**Соискатель:** Пугачёв Александр Олеговича

**Тема диссертации:** «Щёточные уплотнения в роторных системах авиационных двигателей»

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

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

На заседании 14 марта 2016 года диссертационный совет пришёл в выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Пугачёву Александру Олеговичу учёную степень доктора технических наук.

**Присутствовали:**

*председатель диссертационного совета:* Равикович Ю.А.;

*заместитель председателя диссертационного совета:* Агульник А.Б.;

*учёный секретарь диссертационного совета:* Зуев Ю.В.;

*члены диссертационного совета:* Абашев В.М., Демидов А.С., Дзюбенко Б.В., Козлов А.А., Коротеев А.А., Кочетков Ю.М., Краев В.М., Кулешов Н.В., Марчуков Е.Ю., Мякочин А.С., Надирадзе А.Б., Назаренко И.П., Ненарокомов А.В., Никитин П.В., Попов Г.А., Светлов В.Г., Тазетдинов Р.Г., Тимушев С.Ф., Хартов С.А., Чванов В.К.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д 212.125.08, д.т.н., профессор

Зуев

Юрий Владимирович





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

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 14.03.2016 г. № 2

О присуждении Пугачёву Александру Олеговичу, гражданину РФ, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Щёточные уплотнения в роторных системах авиационных двигателей» по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» принята к защите 30.11.2015 г., протокол № 39 диссертационным советом Д 212.125.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета – № 2249-1460 от 02.11.2007 г., об изменении состава диссертационного совета – № 1986-540/1460 от 21.11.2008 г., о продлении срока действия диссертационного совета – № 1925-601 от 08.08.2009 г., о соответствии диссертационного совета «Положению о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» – № 105/нк от 11.04.2012 г., об изменении состава диссертационного

совета № 508/нк от 22.08.2012 г., об изменении состава диссертационного совета – № 548/нк от 06.10.2014 г.

Соискатель Пугачёв Александр Олегович 1980 года рождения является докторантом в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук «Динамика переходных режимов работы роторов на радиальных подшипниках скольжения» защитил в 2004 году в диссертационном совете, созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет».

Диссертация выполнена на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Равикович Юрий Александрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Конструкция и проектирование двигателей», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. Иванов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», заместитель исполнительного директора по качеству;
2. Темис Юрий Моисеевич, доктор технических наук, профессор, государственный научный центр федеральное государственное унитарное

предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», отдел «Математическое моделирование и САПР ГТД», начальник отдела;

3. Фалалеев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», кафедра «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов», заведующий кафедрой

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – публичное акционерное общество «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (г. Уфа), в своем положительном заключении, подписанном Мухиным А.Н., к.т.н., главным конструктором, начальником расчетно-исследовательского отдела, Брыкиным Б.В., к.т.н., инженером-конструктором 1 категории и утвержденном Марчуковым Е.Ю., д.т.н., проф., генеральным конструктором, указала, что диссертационная работа является своевременной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи по разработке метода определения характеристик щёточных уплотнений. Достоверность результатов работы подтверждается использованием фундаментальных законов газовой динамики, применением верифицированного программного комплекса и удовлетворительным согласованием расчётных и экспериментальных результатов. Результаты диссертации имеют практическую значимость и могут быть использована в научных и прикладных исследованиях, ведущихся в учебных, научно-исследовательских организациях и на промышленных предприятиях, в частности МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, СГАУ, АО «НИИД», ОАО «ВТИ», НПО «Сатурн», НПЦГТ «Салют», ОАО «Турбина», КБ Климова, МПП им. Чернышева, ИВТ РАН, ГосНИИ АС, ОКБ им. А. Льюльки, ПАО «УМПО», ОАО «Авиадвигатель».



В заключении отмечено, что диссертационная работа выполнена на достойном уровне и соответствует требованиям и критериям Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК РФ для диссертационных работ на соискание учёной степени доктора наук, а ее автор, Пугачёв Александр Олегович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Соискатель имеет 70 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 65 работ; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (журналах) — 17 общим объёмом 20 п.л.; 36 докладов на научных конференциях; 4 тезиса докладов на научных конференциях; 3 патента; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ; 1 монография. Часть работ опубликована в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим, а опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при непосредственном участии соискателя. Без соавторов опубликовано 10 статей в научных изданиях.

В опубликованных работах излагаются основные положения разработанных математических моделей для моделирования уплотнений и динамики роторов, описываются экспериментальные методики и представлены основные результаты по расходным и динамическим характеристикам щёточных и щёточно-лабиринтных уплотнений, а также результаты по динамическому анализу роторных систем. Наиболее значимые работы по теме диссертации из числа рецензируемых научных изданий:

1. Pugachev A.O., Helm P. Calibration of porous medium models of brush seals // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2009. Vol. 223. No. 1. Pp. 83-91.

2. Pugachev A.O., Deckner M. Experimental and theoretical rotordynamic stiffness coefficients for a three-stage brush seal // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. Vol. 31. Pp. 143-154.

3. Пугачёв А.О. Моделирование щёточных уплотнений для анализа их влияния на динамику роторов // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 3 (42). С. 22-30.

4. Пугачёв А.О. Расчёт расходной характеристики щёточных уплотнений с использованием модели пористой среды // Мир транспорта и технологических машин. 2013. № 2 (41). С. 24-32.

5. Пугачёв А.О., Равикович Ю.А. Подходы к моделированию щёточных уплотнений турбомашин // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 4. С. 81-89.

6. Пугачёв А.О., Равикович Ю.А. Применение щёточных уплотнений в конструкциях современных турбомашин // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 67-75.

7. Gazner M., Pugachev A.O., Georgakis C., Cooper P. Leakage and rotordynamic coefficients of brush seals with zero cold clearance used in an arrangement with labyrinth fins // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2013. Vol. 135. No. 12. Pp. 122506-11.

8. Пугачёв А.О. Подходы к упрощённому расчёту расхода щёточных уплотнений // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 85-93

9. Pugachev A.O., Sheremetyev A.V., Tykhomirov V.V., Shpilenko O.I. Structural dynamics optimization of rotor systems for a small-size turboprop engine // Journal of Propulsion and Power. 2015. Vol. 31. No. 4. Pp. 1083-1093.

10. Pugachev A.O., Gaszner M., Georgakis C., Cooper P. Segmentation effects on brush seal leakage and rotordynamic coefficients // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2016. Vol. 138. No. 3. Pp. 032501-9.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:**

**Отзыв на диссертацию официального оппонента** д.т.н., доц., заместителя исполнительного директора по качеству АО «КБХА» **Иванова Андрея Владимировича**. Замечания по диссертационной работе следующие:

1. В диссертации встречаются величины в разных системах измерения СИ и МКГСС, например на с. 17 температура приведена в оС, давление – в атм, а на с. 95 температура – в К, давление – в МПа.
2. Терминология не всегда соответствует принятой в отечественной литературе, а является дословным переводом с английского, например, в диссертации используется термин «листовые уплотнения», в отечественной практике общеупотребимым является термин «лепестковые уплотнения».
3. Диссертация перегружена обзором литературы, включая конструкцию уплотнений, методы расчета уплотнений, динамических характеристик роторов, рассмотрением других видов уплотнений – щелевых, и, особенно, лабиринтных (в том числе с разным количеством гребешков).
4. В разделе 4.3 рассматриваются динамические характеристики роторов без привязки к уплотнениям, раздел 4.4, рассматривающий влияние уплотнений на динамику роторов, за исключением с. 202, посвящен бесконтактным, а не щеточным уплотнениям.
5. В диссертации целесообразно было бы привести обобщенные зависимости, сопоставляющие лабиринтные и щелевые уплотнения при различных окружных скоростях и перепадах давления.
6. Экспериментальные данные приведены достаточно скупо, хотелось бы увидеть сопоставление вариантов щеточных уплотнений, их исследование при различном сочетании параметров.
7. Рекомендации по применению щеточных уплотнений в конструкциях двигателей летательных аппаратов целесообразно было бы выполнить с бóльшим количеством схем, графиков и диаграмм.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента** д.т.н., проф., начальника отдела «Математическое моделирование и САПР ГТД» ГНЦ ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова» **Темиса Юрия Моисеевича**. Замечания по диссертационной работе следующие:



1. Диссертационная работа переразмерена. Половину текста работы составляют методические материалы, объем которых можно было бы сократить, предоставив при редактировании место для более подробного освещения результатов автора.
2. Выводы по главам, заключение и формулировки научной новизны работы размыты и неконкретны.
3. Имеет место неполнота представления результатов. Так, например, в таблицах 5.11 и 5.12 приведены параметры, описание которых в тексте работы отсутствует. При каких условиях проводились статический и динамический анализы? Что такое «крутильные» напряжения (стр.257)?
4. На ряде рисунков и схем, например, рис. 2.21, 2.22, 2.23. 2.24, 2.25 либо отсутствуют пояснительные подписи и сноски, либо они на языке оригинала.
5. Все результаты приведены для изотермического случая, несмотря на то, что технология ВГД позволяет решать, рассмотренные в диссертации задачи с учетом теплообмена.
6. Стр.189-190 – учет эффекта от контактного взаимодействия. Непонятно, почему приведенная масса  $M$  и амплитуда  $A$  имеют размерность кг? При этом отметим, что автор при наступлении контакта ротора с корпусом в системе численного моделирования ступенчато изменил жесткость и демпфирование. Однако, не ясно учитывал ли он времена соприкосновения и отскока и особенности маятниковых колебаний.
7. Отметим, что осесимметричная трехмерная (стр. 167) модель ротора неприемлема для исследования. Возможно, автор имел в виду трехмерную модель с использованием разложения в ряд Фурье по окружности?
8. В работе создана система моделей, методов и алгоритмов математического моделирования щеточных уплотнений, выполнено их сравнение. Однако, автор в заключении и выводах не привел окончательных реко-



мендаций о необходимости разработки моделей разного уровня сложности для проектирования уплотнений.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента** д.т.н., проф., заведующего кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» **Фалалеева Сергея Викторовича**. Замечания по диссертационной работе следующие:

1. излишне подробно изложен материал в 1 и 2 главе, также большое внимание в диссертации уделено лабиринтным уплотнениям, при этом обзор опубликованных работ выполнен не критическим;
2. изложение материала иногда представлено в виде руководства по проведению научного исследования, и не всегда приведено принципиальное влияние различных параметров на характеристики щеточных уплотнений;
3. рассмотрена система "ротор-уплотнения", однако, на мой взгляд, необходимо рассматривать систему "ротор-опоры-уплотнения" с учетом жесткости статорной части опор;
4. в главе 4 представлены теоретические инструменты для анализа динамического поведения роторных систем с учётом уплотнений, однако не продемонстрировано влияние параметров щеточного уплотнения на динамику ротора;
5. в диссертации указано, что динамическая модель газового слоя в уплотнении строится по аналогии с подшипниками скольжения. Это, судя по всему, относится к рассматриваемым в диссертации уплотнениям - лабиринтным и щеточным с зазором. Однако при работе в воздушной среде зазоры у этих устройств сильно отличаются и такая аналогия не корректна. При этом, щеточные уплотнения, устанавливаемые на вал с на-

тягом, необходимо рассматривать как элементы с конструкционным демпфированием;

6. к сожалению, в диссертации не проведен тепловой анализ щеточного уплотнения, от температуры в зоне контакта зависит изнашивание проволочек и поверхности вала, т.е. ресурс;
7. в приведенной модели деформации волокон щеточного уплотнения в разделе 6.7 рассмотрено только 4 волокна, что не позволяет полностью смоделировать процесс деформирования в реальном уплотнении;
8. в диссертации используются не общепринятые технические термины.

**Отзыв на диссертацию ведущей организации ПАО «УМПО».** Замечания по диссертационной работе следующие:

1. Расчётная ВГД модель на основе модели пористой среды позволяет определить лишь аэродинамические составляющие коэффициентов жесткости и демпфирования. Поэтому результаты ВГД-модели не могут быть непосредственно использованы при анализе ЩУ, устанавливаемых с нулевым номинальным зазором или внахлест.
2. Для верификации численной методики расчета ЩУ использованы экспериментальные данные, по которым не приведена информация о погрешности эксперимента.
3. Описанный подход не учитывает дискретную природу отдельных волокон, а коэффициенты сопротивления среды обладают полуэмпирическими свойствами, не учитывается осевая деформация волокон, которая в общем случае приводит к увеличению расхода через уплотнение. Замена дискретной структуры ЩУ на модель пористой среды безусловно оправдана, так как моделирование волокон требует серьезных вычислительных ресурсов, однако, в этом случае появляется необходимость корректировки и уточнения модели, в том числе подбора радиального зазора и изменения коэффициентов сопротивления.



4. На графике зависимости эффективного радиального зазора от перепада на базовых ЩУ (рис.7.11), полученном экспериментальным путём, наблюдается колебания расхода газа для некоторых из типов ЩУ. Изменение расхода при одинаковом перепада на ЩУ в процессе эксперимента, вероятно, вызвано «эффектом гистерезиса», возникающим при увеличении и уменьшении перепада давления на уплотнении. Для некоторых типом ЩУ изменения эффективного зазора уплотнения достигает 25%.
5. В предложенной инженерной методике оценка проводится лишь исходя из перепада давления через уплотнение. Влияние скорости вращения и эксцентричного положения вала, а также влияние закрутки потока газа на величину расхода в данном случае не рассматривается. Таким образом, методика оценивает лишь наиболее общий случай работы уплотнения.

**На автореферат диссертации поступило 13 отзывов.** Все отзывы, поступившие на автореферат диссертации, положительные. В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы, отмечены новизна, достоверность полученных автором результатов и их практическая значимость.

**Отзыв на автореферат** генерального директора ООО НТЦ «АПИ» д.т.н. Шелюфа В.В. содержит следующие замечания:

1. Из автореферата неясно, в термической или изотермической постановке решалась задача течения через щеточный пакет.
2. На стр.16 автореферата говорится об использовании двухпараметрической модели турбулентности SST, принятой в качестве базовой для расчетов течений. Исследовались ли результаты при использовании альтернативных моделей, например, однопараметрической модели Спарта-Аллмараса (SA) и ее модификаций?
3. Из автореферата неясно, насколько аргументированным представляется выбор модели анизотропной пористой среды (2) (стр.16-17), и, в

частности, коэффициентов модели (3) при исследовании течений через щеточный пакет.

4. Из автореферата также неясно, совместно ли проводился анализ течений через щеточный пакет со структурным анализом самого пакета.

**Отзыв на автореферат ОАО «Авиадвигатель»**, подписанный учёным секретарём НТС, к.т.н. Саженовым А.Н. и утверждённый управляющим директором — генеральным конструктором, д.т.н., проф. Иноземцевым А.А., содержит следующее замечание:

1. не рассмотрен аспект долговечности щеточных уплотнений, который наряду с расходными и динамическими характеристиками будет определять их применение в перспективных авиационных двигателях.

**Отзыв на автореферат** заведующего кафедрой «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» д.т.н., проф. Ягодникова Д.А. содержит следующие замечания:

1. В автореферате результаты приведены в основном как функции перепада давления. Однако большой практический интерес представляют также зависимости характеристик уплотнений от скорости вращения ротора и закрутки газа на входе в уплотнение.
2. В разделе автореферата, содержащем материалы Главы 5, не приведены конкретные результаты математического моделирования с использованием ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, а также результаты проверки адекватности математической модели уплотнений.
3. Большой экспериментальный материал не представлен автором в какой-либо обобщающей форме, например в виде критериальных зависимостей, что ограничивает широкое практическое использование результатов.



4. Название работы не отражает решаемых научных задач. Кроме того, цели диссертации сформулирована не конкретно и содержит общие фразы, нехарактерные для научной работы.

**Отзыв на автореферат** заместителя генерального директора — главного конструктора АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко» д.т.н., проф. Чванова В.К. содержит следующее замечание:

1. отсутствие результатов связанных расчётов деформации волокон вследствие нагрузки от давления и сил трения в щёточном пакете.

**Отзыв на автореферат** начальника сектора Управления информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс» д.т.н. Журавлёва В.Н. содержит следующее замечание:

1. отсутствие сравнения достоинств и расходных характеристик ЩУ с другими типами податливых уплотнений, в частности, с пальчиковыми (лепестковыми) уплотнениями.

**Отзыв на автореферат**, составленный генеральным конструктором АО «Климов», зам. председателя НТС Григорьевым А.В., зам. генерального конструктора по перспективным разработкам, руководителем экспертного совета Леонтьевым В.В. и инженером-конструктором, к.т.н. Шаровой Н.А., не содержит замечаний.

**Отзыв на автореферат**, составленный заведующим кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг» ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет», д.т.н., проф. Савиным Л.А. и старшим научным сотрудником, к.т.н., доц. Корнаевым А.В., содержит следующие замечания:

1. В выносимых на защиту научных положениях (стр. 7, 8) недостаточно четко изложены отличительные особенности полученных научных результатов.
2. Наличие в целевых уплотнениях контактного взаимодействия волокон внутри пакета и с поверхностью вала предполагает целесообразность учета в расчетных моделях диссипативных процессов и изменения тем-

пературного состояния, что оказывает влияние на упругость щетки и, следовательно, на расход и динамические характеристики уплотнений. В этой связи необходимо обосновать допущение об изотермичности.

3. Положение 6 научной новизны (стр. 6) свидетельствует о выявлении закономерности влияния щеточных уплотнений на динамику роторов. Полученные соискателем коэффициенты жесткости и демпфирования позволяют оценить влияние уплотнений на критические частоты роторов, в частности построены диаграммы Кэмпбелла, однако в автореферате отсутствует графическая и текстовая информация об этой закономерности.
4. В автореферате недостаточно информации об оценке влияния щелевых уплотнений на устойчивость движения ротора. Представленные на рис. 21 орбиты траекторий движения, полученные с помощью пакета «MRACE», свидетельствуют о негативном влиянии уплотнений на амплитуды колебаний. Однако этот результат следует рассматривать как частный случай.
5. Заключение по результатам исследования (стр. 41-43) носит в основном констатирующий характер. Можно отметить недостаточно рельефное представление полученных в диссертационной работе научных результатов и выводов.

**Отзыв на автореферат** заместителя заведующего кафедрой «Авиационные двигатели» **ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»** д.т.н., проф. Нихамкина М.Ш. содержит следующие замечания:

1. Из автореферата не ясно, какие именно подходы использованы для адаптации модели пористой среды к щеточным уплотнениям.
2. В автореферате приведен анализ влияния конструктивных параметров щеточного уплотнительного элемента (такие как диаметр щетинок, их густота, угол наклона) в относительно узком диапазоне (например: диа-



метр щетинок 70...167 мкм, угол наклона щетинок 45...50°). Не раскрытым остается вопрос обоснованности выбора номинальных конструктивных параметров уплотнительного элемента и диапазона их изменения.

3. Не рассмотрены вопросы изменения характеристик щёточных уплотнений в результате износа в процессе эксплуатации.

**Отзыв на автореферат** заведующего кафедрой «Авиационные двигатели» **ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»** д.т.н., проф. Ремизова А.Е. содержит следующие замечания:

1. отсутствует анализ работы щёточных уплотнений на переходных режимах ГТД, а также оценка инерционных свойств щёточных уплотнений на этих режимах;
2. в автореферате не приводится анализ типичных эксплуатационных дефектов щёточных уплотнений, таких как сваривание волокон;
3. разработанные математические модели не предусматривают возможности оценки влияния окружной неравномерности давления в полости утечки через щёточные уплотнения и на их динамические характеристики;
4. в автореферате не представлены результаты проведенного автором обобщения опыта использования щёточных уплотнений в авиационных двигателях (стр. 12 автореферата);
5. при описании используемой модели щёточного уплотнения (стр. 24 автореферата) не указывается в чем ее отличие от модели подшипника скольжения.

**Отзыв на автореферат ПАО «НПО Сатурн»**, подписанный начальником КО ПР и ЭИ ГТД, к.т.н. Кикоть Н.В., ведущим инженером-конструктором Лебедевым М.В., ученым секретарем НТС, инженером-конструктором 1 кате-

гории, к.т.н. Левитовой О.Н. и утверждённый председателем НТС, генеральным конструктором, д.т.н. Шмотиным Ю.Н., содержит следующие замечания:

1. отсутствие обобщения по диапазонам параметров (конструкций щёточных уплотнений, параметров газа), для которых справедливы разработанные математические модели;
2. для сокращения времени анализа роторных систем со щёточными уплотнениями не рассмотрена возможность использования менее трудоёмких, по сравнению с ANSYS, программного комплексом, например, DYNAMICS.

**Отзыв на автореферат** профессора кафедры АД ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» д.т.н., проф. Кривошеева И.А. содержит следующие замечания:

1. при описании газодинамических характеристик уплотнений используются обозначения, не принятые в Теории ВРД, а принятые в ракетной технике;
2. кроме того используется принятый в гидравлике "перепад давления" и не используются газодинамические функции.

**Отзыв на автореферат** первого проректора ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» д.т.н., проф., профессора кафедры «Ракетные двигатели» Дроздова И.Г. не содержит замечаний.

**Отзыв на автореферат** начальника 73 кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» к.т.н., доц. Черкасова А. содержит следующие замечания:

1. «Заключение», приведенное в автореферате содержит большое количество рассуждений общего плана. Оценка автором степени и качества выполнения задач, сформулированных в разделе «Общая характеристика работы», в «Заключении» присутствует, но отражена «расплывчато».

2. В автореферате присутствуют предложения с нарушением синтаксической структуры. Пример на странице 35 — «Приводятся результаты по применению разработанной методики...»; «Целью обобщения результатов является в компактной форме...», на странице 36 — «Представляется сложным выбор одного параметра, по которому проводить сравнение...».

**Выбор официальных оппонентов** обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа Пугачёва А.О., что подтверждается публикациями оппонентов по тематике исследования.

**Ведущая организация выбрана** в соответствии с ее широко известными достижениями в научных исследованиях, испытаниях, разработках и производстве в двигателестроении, способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

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

**разработана** иерархическая система моделей и методов многопараметрического математического моделирования параметров щёточных уплотнений турбомашин, позволяющая определять расходные и динамические характеристики щёточных уплотнений;

**предложена** и включена в общую аэродинамическую модель щёточного уплотнения новая модель пористой среды, адаптированная к условиям течения газа в щёточном пакете;

**доказана перспективность** использования разработанных математических моделей при изучении аэродинамических, механических и тепловых процессов, протекающих в щёточных уплотнениях, а также при практическом внедрении щёточных уплотнений в конструкциях авиационных двигателей.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что: **применительно к проблематике диссертации результативно использован** комплекс численных методов и алгоритмов для проведения вычислительных



экспериментов по моделированию уплотнений турбомашин, а также современных экспериментальных методик, включая уникальный экспериментальный метод определения динамических коэффициентов жёсткости и демпфирования уплотнений;

**изложены** положения и идеи, позволяющие описывать состояние щёточного уплотнения в зависимости от рабочего режима;

**выявлены** новые проблемы динамического анализа роторных систем с учётом влияния щёточных уплотнений;

**изучена** и обобщена взаимосвязь между различными параметрами щёточных уплотнений и их рабочими характеристиками;

**проведена модернизация** алгоритмов и программного обеспечения для выполнения моделирования щёточных уплотнений методами вычислительной гидродинамики, а также динамики роторов методом конечных элементов, **которая обеспечила получение новых результатов по теме диссертации.**

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

**разработана** современная методика расчёта щёточных уплотнений, которая может стать основой для практической работы опытно-конструкторских бюро, занимающихся вопросами проектирования турбомашин и авиационных двигателей;

**разработан** новый экспериментальный стенд на кафедре «Конструкция и проектирования двигателей» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» для изучения характеристик щёточных уплотнений.

**Результаты работы внедрены** в научную деятельность ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» при выполнении гранта мероприятия 1.5 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и в рамках сотрудничества с АО «Климов». **Результаты работы также внедрены** в учебный процесс ФГ-

БОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» при подготовке дипломированных специалистов соответствующих специальностей;

**определены пределы и перспективы практического использования** щёточных уплотнений в авиационных двигателях;

**созданы практические инструменты** в виде программного обеспечения для проведения инженерных расчётов щёточных уплотнений и динамики роторов с учётом уплотнений;

**представлены методические рекомендации** по использованию разработанных математических моделей и методик;

**представлены предложения** по дальнейшей разработке перспективных уплотнений с податливыми элементами.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила, что:

**экспериментальные результаты** получены на двух экспериментальных стендах с использованием сертифицированного оборудования;

**показана воспроизводимость результатов** исследования при различных условиях;

**теория моделирования щёточных уплотнений построена** с использованием современных апробированных положений и методов **и согласуется** с полученными экспериментальными данными, демонстрируя удовлетворительную точность;

**идеи базируются** на анализе и обобщении теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации;

**установлено качественное и количественное совпадение** авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Личный вклад соискателя** состоит в:

**разработке** математических моделей и практических инструментов для расчёта уплотнений и динамики роторов



**получении и апробации** теоретических результатов исследования;  
**непосредственном участии** в разработке экспериментальных установок для исследования расходных и динамических характеристик щёточных уплотнений, проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных результатов;  
**подготовке публикаций** по основным результатам выполненной работы.

На заседании 14.03.2016 диссертационный совет принял решение присудить Пугачёву Александру Олеговичу ученую степень доктора технических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человека, из них 10 докторов наук по специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за — 23, против — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 212.125.08,  
д.т.н., с.н.с.

Агульник  
Алексей  
Борисович

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08,  
д.т.н., профессор

Зуев  
Юрий  
Владимирович

Учёный секретарь МАИ,  
к.т.н., доцент

Ульягина  
Алла Николаевна

14 марта 2016 года