

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.07
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА»,
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27.10.2017 г. № 6

О присуждении Саженкову Николаю Алексеевичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Расчетно-экспериментальное моделирование демпфирования рабочих лопаток турбомашин демпферами сухого трения» по специальности 05.04.12 – Турбомашин и комбинированные турбоустановки принята к защите 30 июня 2017 г., протокол № 5 диссертационным советом Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Минобрнауки России, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; созданным приказом Минобрнауки России № 763/нк от 05.11.2013 г.

Соискатель, Саженков Николай Алексеевич, 1988 года рождения, в 2011 году окончил ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет» по направлению «Авиа- и ракетостроение»; в 2014 г. окончил очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов; работает в должности ассистента кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет», Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Нихамкин Михаил Шмерович, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Аэрокосмический факультет, кафедра «Авиационные двигатели», заместитель заведующего кафедрой.

Официальные оппоненты:

Репецкий Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского», проректор по международным связям;

Кистойчев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Турбины и двигатели», доцент, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва – в своем положительном заключении, подписанном Вараксиным Алексеем Юрьевичем, чл.-корр. РАН, д-ром физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», и Манушиным Эдуардом Анатольевичем, акад. РАО, д-ром техн. наук, профессором кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», указала, что кандидатская диссертация Саженкова Николая Алексеевича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи совершенствования методов выбора конструктивных параметров подполочных демпферов сухого трения, имеющей практическое значение для развития отечественного

газотурбостроения в плане сокращения времени доводки ГТУ и обеспечения заявленного ресурса и надежности. Диссертация соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки.

Соискатель имеет 22 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 18 работ, опубликованных **в рецензируемых** научных изданиях – 5.

Другие публикации по теме диссертации представлены в виде 1 патента РФ на полезную модель; 1 статьи в вузовском научном журнале, 11 тезисов докладов, опубликованных в сборниках материалов международных (7) и всероссийских (4) научных конференций. Общий объем опубликованных работ – 5,2 п.л., авторский вклад – 2,2 п. л.

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

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Саженок Н.А. Экспериментальная оценка эффективности демпфирования лопаток турбомашин / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженок // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 2-3. – С. 25–28 (0,25 п.л. / 0,062 п.л.).

2. Саженок Н.А. Методика оценки эффективности межлопаточных фрикционных демпферов в турбинах / М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженок // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – 2012. – № 3, ч. 2. – № 3–2. С. 27–33. (0,4375 / 0,1875 п.л.).

3. Саженок Н.А. Методика конечно-элементного моделирования колебаний систем с фрикционным демпфированием / М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.В. Семенова, Н.А. Саженок, А.А. Балакирев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – 8 с. (0,5 п.л. / 0,125 п.л.).

4. Sazhenkov N.A. Condition Monitoring of Aircraft Engine Rotor System with Stiffness Anisotropy of Rotor Supports. Comparative Analysis of Accelerometers Mounting Schemes / Semenov S.V., Nikhamkin M.A., Sazhenkov N.A., Semenova I.V. // Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations : Proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, CMMNO2014; Lyon, France, December 15-17 10.1007/978-3-319-20463-5. – Cham: Springer Intern. Publ. AG, 2016. – P. 463–471. – (Applied Condition Monitoring; Vol. 4). (0,5625 п.л. / 0,125 п.л.).

5. Sazhenkov N.A. Experimental evaluation of the efficiency of gas turbine engine parts damping with dry friction dampers using laser vibrometer [Electronic resource] / A.A. Balakirev, M.Sh. Nikhamkin, A.Yu. Golovkin, B.P. Bolotov, N.A. Sazhenkov, L.V. Voronov, I.P. Konev // ICAS 2014: proceedings 29th of the Congress The International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014. / International Council of the Aeronautical Sciences. – St. Petersburg: [s. n.], 2014): 7 p. (0,4375 п.л. / 0,062 п.л.).

Патент

6. Пат. РФ № 2602643. Рабочее колесо турбомшины с демпфером для лопаток / Н.А. Саженов, М.Ш. Нихамкин, А.А. Балакирев, С.В. Семенов, А.Ю. Головкин, И.П. Конев. Заявл. 26.10.2016.

На автореферат диссертации поступили положительные отзывы:

1. Шутова Алексея Валерьевича, д-ра физ.-мат. наук, зав. лабораторией механики композитов ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск. Содержит замечание: в автореферате упомянут контактный алгоритм «пенальти». В русскоязычной литературе термин «penalty» чаще фигурирует как «метод штрафных функций».

2. Новикова Дмитрия Константиновича, д-ра техн. наук, профессора кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский

университет имени академика С.П. Королева», г. Самара. Содержит замечания:

- В автореферате не указано, учитывался ли уровень шероховатости поверхностей лопаток и демпфера при проведении экспериментов по определению контактных характеристик?
- Проводилось ли измерение площади контакта с изменением центробежных сил, действующих на демпфер? Если да, то какой характер имеет эта зависимость?
- Изменялись ли в процессе экспериментального исследования перемещения демпфера относительно полок лопаток, для подтверждения факта наличия состояния «залипания» или «проскальзывания»?

3. Сенюшкина Николая Сергеевича, канд. техн. наук, помощника декана Факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта, доцента кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа. Содержит замечание: в автореферате не уделено должного внимания экспериментальному подтверждению работы предлагаемого решения в составе готового изделия, а также деградации параметров демпфирующего элемента в процессе эксплуатации.

4. Ульяницкого Владимира Юрьевича, д-ра техн. наук, доцента, заведующего лабораторией детонационных течений, и **Штерцера Александра Александровича**, д-ра техн. наук, доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории детонационных течений ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск. Содержит замечания:

- На стр. 18 указано, что эффективность демпфирования колебаний лопаток описывается параметром ξ и приводится для него формула $\xi = \delta / \delta^* = A^* / A$, где δ и δ^* - соответственно логарифмический декремент колебаний лопаток с демпфером и лопаток без демпфера. Здесь, видимо,

ошибка или описка. Наверное, правильно написать $\xi = \delta / \delta^* = \ln(A^*/A)$, поскольку логарифмический декремент колебаний по определению есть логарифм отношения амплитуд.

- То, что называется на стр.18 параметром эффективности демпфирования ξ , на рис. 17 в подписи к рисунку называется относительным коэффициентом демпфирования, На наш взгляд, правильнее было бы назвать этот параметр одинаково везде по тексту.

5. Такмовцева Владимира Викторовича, канд. техн. наук, доцента кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань. Содержит замечания:

- Судя по автореферату, в работе не хватает расчетной или экспериментальной оценки эффективности предлагаемой «адаптивной» конструкции демпфера.

- В автореферате встречаются термины «зоны залипания», «площади залипания». Желательно использовать единую терминологию.

6. Владыкина Алексея Валерьевича, канд. техн. наук, заместителя начальника центра прогрессивных технологий АО «ОДК - Пермские моторы», г. Пермь. Содержит замечания:

- На рис. 8 стр. 12 автореферата не корректно подписан участок макроскольжения и отсутствуют обозначения типов скольжения на линиях соответствующих обратному движению петли гистерезиса. Отличаются ли они от обозначенных ранее этапов залипания, микроскольжения и макроскольжения?

- Чем характерны точки 1, 2, 3 стадии макроскольжения, обозначенные в подписи к рис. 8 автореферата?

- Из автореферата не ясно в чем смысл использования различных алгоритмов редукции Гуана и Крейга-Бэмптона для демпфера и лопаток соответственно?

7. Андрейченко Игоря Леонардовича, канд. техн. наук, начальника Отделения динамики и прочности АО «ОДК - Авиадвигатель», г. Пермь. Содержит замечания:

- В автореферате не указано, при какой частоте или диапазоне частот колебаний производились измерения петель гистерезиса для пар материалов «жаропрочный сплав на никелевой основе – нержавеющая сталь». Соответствовал ли он диапазону, в котором изменялись значения 1-й изгибной синфазной и противофазной форм колебаний рабочих лопаток?

- В автореферате не представлено, каким образом произведено моделирование контакта между лопатками и демпфером в расчетной модели.

8. Кожинной Татьяны Дмитриевны, д-ра техн. наук, профессора, проректора по науке и инновациям ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск Ярославской обл. Содержит замечания:

- Автор проводит исследование блока из 2 лопаток и демпфера, не учитывая влияния двух демпферов на лопатку, смежную с ними. Это, на мой взгляд, снижает адекватность модели взаимодействия на сопрягаемых поверхностях.

- В автореферате (с. 13) указано, что контактное взаимодействие на поверхностях контакта лопаток и демпфера и изменение во времени контактных площадок описывались с помощью алгоритма «пенальти». Применение данного термина является не совсем уместным. Более корректным было бы применить термин «метод штрафных функций».

9. Шорра Бориса Фёдоровича, д-ра техн. наук, профессора, главного научного сотрудника отделения динамики и прочности авиационных двигателей, и **Серебрякова Николая Николаевича**, канд. техн. наук, начальника сектора отделения динамики и прочности авиационных

двигателей ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», г. Москва. Содержит замечания:

- При переходе от клиновидной массивной вставки модели к пластиночному демпферу натурной турбины резко меняется жесткость вставки. В работе вопрос влияния жесткости демпфера (а не только его массы) на качественный и количественный результат оценки эффективности демпфирования явно не обсуждался.

- Предложенная конструкция упругого «адаптивного демпфера» должна быть изучена с точки зрения собственной прочности и сохранения его конфигурации при вращении.

10. Сиротина Николая Николаевича, д-ра техн. наук, профессора кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Содержит замечания:

- В материалах автореферата не показано влияние состояния поверхности контакта, фреттинг-коррозии по поверхностям контакта, температуры материала лопаток и демпфера на закономерности контактного взаимодействия лопаток турбин с подполочными демпферами сухого трения.

- На 3-й странице (3-й абзац снизу) автор употребляет сочетание слов «лопаточного аппарата». В учебной и технической литературе обычно употребляют «рабочие лопатки и лопатки направляющего аппарата», но не «лопаточного аппарата».

- Имеются стилистические неточности (стр. 3, 4). Например, стр. 3 автор утверждает «... этот метод продолжает и сейчас в мире являться эффективным направлением сопротивляемости вибрациям вновь проектируемых лопаток». Некорректность состоит в том, что «метод» не может быть «направлением». Стр. 4. Цель сформулирована слишком сложно, что закрывает суть цели исследования.

11. Марковича Дмитрия Марковича, член-корреспондента РАН, д-ра физ.-мат. наук, директора института, и Дулина Владимира Михайловича, д-ра физ.-мат. наук, старшего научного сотрудника лаборатории физических основ энергетических технологий ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск. Содержит замечания:

- Остается неясным, почему диапазон частот возбуждаемых колебаний блока лопаток в эксперименте был ограничен значением в 500 ГЦ.
- В автореферате указано, что «Точность измерения амплитуды отклика составляет 0,01 мкм». Учитывая длину волны лазера и оптическое разрешение матрицы регистратора, точность в 10 нм представляется значительно завышенной;
- В автореферате не представлены результаты измерений или численного моделирования для предложенной конструкции адаптивного демпфера (Глава 5);
- В тексте автореферата имеются опечатки (напр., «для условий центробежных нагрузках» на стр. 5).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области двигателестроения и энергетических установок; их высокой научной компетентностью в вопросах повышения эффективности газовых турбин, наличием публикаций в данных областях науки, способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработаны** экспериментальная и численная методики исследования эффективности демпферов сухого трения в процессе нестационарных резонансных колебаний рабочих лопаток турбомашин в

условиях, действующих на демпфер центробежных нагрузок, а также экспериментальная методика оценки контактных характеристик пар трения;

- **предложены** низкозатратная методика численного проектирования демпферов сухого трения на основе разработанного расчётного подхода на базе методов редукции динамической системы и новая конструкция демпфера, сохраняющего максимальную эффективность на выбранном режиме работы турбоагрегата;

- **доказана** эффективность предложенной на базе субструктур численной методики, позволившей снизить время расчёта при решении задачи нестационарного взаимодействия с контактными нелинейностями на 60...80% (5...10 ч) по сравнению с полной моделью; доказана необходимость применения «адаптивной» схемы подполочных демпферов на примере исследования эффективности демпфирования рабочих лопаток турбины ГТУ (газотурбинной установки) 12ПГ-2 с демпфером базовой конструкции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что

- **применительно к проблематике диссертации результативно использованы** новые методы расчёта резонансных вибраций рабочих лопаток турбомашин с подполочными демпферами на основе 3-D нестационарного моделирования в нелинейной постановке;

- **получены новые** характеристики контактного высокочастотного взаимодействия пар материалов, применяемых в газотурбостроении: «жаропрочный сплав на никелевой основе – жаропрочный сплав на никелевой основе», «жаропрочный сплав на никелевой основе – нержавеющая сталь»;

- **изучено** влияние величины моделируемой центробежной нагрузки, действующей на демпфер, на амплитуду резонансных колебаний по синфазной и противофазной 1-й собственной форме колебаний рабочих лопаток турбомашин.

-изучены особенности работы демпферов сухого трения, заключающиеся в существенном снижении эффективности демпфирования, вследствие их заклинивания между трактовыми полками рабочих лопаток под действием высоких центробежных нагрузок на рабочих режимах турбомашин.

- **получены** новые значения коэффициентов трения 0.9...0.65 для контактных пар материалов, применяемых для изготовления рабочих лопаток турбин и демпферов и отличающихся от традиционно приводимых в справочниках значений 0,15...0,2.

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

- **разработана и защищена** патентом новая «адаптивная» конструкция подполочного демпфера сухого трения для рабочих лопаток турбомашин;

- результаты диссертационной работы уже **использованы** АО «ОДК-Авиадвигатель» для совершенствования математических моделей нестационарного взаимодействия рабочих лопаток турбин и демпферов сухого трения, применяемых при разработке наземных ГТУ;

- результаты исследований **используются** в учебном процессе подготовки кадров по направлению 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», реализуемому на кафедре «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты исследования получены с использованием метрологически аттестованного экспериментального оборудования и сертифицированного программного обеспечения. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами проведенных испытаний. В работе отмечено качественное совпадение результатов определения зависимостей контактных

характеристик от нормального усилия с результатами, полученными другими авторами и представленными в независимых источниках. Автором диссертационной работы использовались научные методы исследования и общепринятые положения механики деформируемого твердого тела и теории модального анализа.

Личный вклад соискателя состоит в научно-техническом обосновании актуальности, целей и задач исследования; анализе и систематизации данных открытых источников о вопросах математического и экспериментального моделирования демпфирования рабочих лопаток ГТУ и конструктивных решениях, применяемых в ГТУ при организации демпфирования сухим трением; разработке методик лабораторного эксперимента и расчетного анализа; проведении всех экспериментальных и расчетных работ и обобщении полученных результатов; разработке методики выбора геометрических параметров и массы подполочного демпфера ГТУ на основе оперативного расчёта амплитуды резонансных колебаний демпфируемой системы; разработке новой конструкции демпфера «адаптивного» типа; подготовке публикаций по выполненной работе.

Диссертация Саженкова Н.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, в которой содержится решение научной задачи по разработке демпфирующих устройств лопаточного аппарата газовых турбин, позволяющей обеспечить необходимый ресурс и высокую надежность ГТУ, и совершенствования технологии их проектирования и доводки, имеющих существенное значение для развития энергетики страны.

На заседании 27 октября 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Саженкову Н.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертаци-

44

ции, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета



Бродов Юрий Миронович

Ученый секретарь
диссертационного совета

27 октября 2017 г.



Аронсон Константин Эрленович