

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.075.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАШИНОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.04.2021 г., протокол № 15

О присуждении **Москальцу Артему Анатольевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Применение моделей различной размерности для оценки вибрации турбинных лопаток» по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» принята к защите 28 декабря 2020 года (протокол заседания № 14) диссертационным советом Д 002.075.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61, в соответствии с приказом о создании диссертационного совета № 930/нк от 14 июля 2016 года Министерства образования и науки Российской Федерации.

Соискатель Москалец Артем Анатольевич, 1991 года рождения, в 2015 г. окончил магистратуру по направлению «Прикладная механика» кафедры «Машиноведение и основы конструирования» института машиностроения, материалов и транспорта (ИММиТ) в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»). В 2019 г. окончил аспирантуру по направлению «Машиностроение» и по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин», ФГАОУ ВО «СПбПУ», ИММиТ, Высшая школа машиностроения (ВШМ). В 2020 г. сдал кандидатский экзамен по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры». Работает старшим преподавателем в ВШМ, ИММиТ, ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Диссертация «Применение моделей различной размерности для оценки вибрации турбинных лопаток» выполнена в ВШМ, ИММиТ, ФГАОУ ВО «СПбПУ» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Беляев Александр Константинович, главный научный

сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук», профессор Высшей школы механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

– Гордеев Борис Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории волновой динамики, экспериментальной механики и виброзащиты машин Института проблем машиностроения – филиала ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»,

– Шалобаев Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент факультета проектной инженерии и компьютерной техники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»), филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» – в своём положительном отзыве, подписанном Матвеевко Валерием Павловичем, академиком РАН, доктором технических наук, профессором, директором «ИМСС УрО РАН», и Юрловой Наталией Алексеевной, кандидатом физико-математических наук, доцентом, ученым секретарём «ИМСС УрО РАН», указала, что работа посвящена актуальной теме – разработке способа оценки вибрационного напряженно-деформированного состояния турбинных лопаток, включающего в себя модели различной размерности, с учетом поправки к первой собственной частоте колебаний лопатки, обусловленной ее эрозионным изнашиванием.

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком современном научном уровне. Полученные в диссертации результаты являются новыми, имеющими большое как научное, так и практическое значения и вносящими значительный вклад в решение задачи обеспечения вибрационной надёжности турбинных лопаток с учетом их эрозионного изнашивания на стадии проектирования.

Диссертационная работа «Применение моделей различной размерности для оценки вибрации турбинных лопаток» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Москалец Артем Анатольевич заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Соискатель имеет 18 опубликованных работ по теме диссертации опубликовано, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ (3 работы входят в перечень ВАК, 5 работ входят в базу данных Scopus). В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, их виде, авторском вкладе и объеме научных изданий. Наиболее значительными являются работы Москальца А.А., опубликованные **в журналах из перечня ВАК РФ:**

1. Елисеев, В.В. Анализ деформаций турбинных лопаток на основе полной одномерной модели/ В.В. Елисеев, А.А. Москалец, Е.А. Оборин // Тяжелое машиностроение. М.: Фонд поддержки и развития Научно-производственного объединения «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», 2015. – № 5. – с. 35-38.

2. Елисеев, В.В. Применение уравнений Лагранжа для расчета колебаний лопаток/ В.В. Елисеев, А. А. Москалец, Е. А. Оборин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. М.: ООО «Издательский дом "Спектр"», 2015. – № 8. – с. 21-24.

3. Елисеев, В.В. Оценка опасности каплеударной эрозии методами теории контактных упругих деформаций / М.А. Скотникова, В.В. Елисеев, А.А. Москалец // Известия Самарского научного центра РАН, 2016. – №1 (2). – с. 296-299.

в изданиях, индексируемых Scopus:

4. Yeliseyev, V.V. Computational technique of plotting Campbell diagrams for turbine blades // Advances in Mechanical Engineering. Springer international Publishing, Switzerland, 2016. – p. 37-44.

5. Yeliseyev, V.V. One-Dimensional Models in Turbine Blades Dynamics / V.V. Yeliseyev, A.A. Moskalets, E.A. Oborin // Advances in Mechanical Engineering. Springer international Publishing, Switzerland, 2016. – p. 93-104.

6. Yeliseyev, V.V. Application of the theory of contact elastic deformations for assessing the risk of destruction of turbine blades as a result of high-speed impact by steam particles / V.V. Yeliseyev, M.A. Skotnikova, A.A. Moskalets, N.A. Krylov// International Review of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 11. – № 5. – p. 350-355.

7. Yeliseyev, V.V. Vibrations of turbine blades as elastic shells / V.V. Yeliseyev, A.A. Moskalets// Advances in Mechanical Engineering. Springer international Publishing, Switzerland, 2018 – p. 53-60.

8. Zinovieva, T.V. Modal Analysis of Turbine Blade as One-and Three-Dimensional Body / T.V. Zinovieva, A.A. Moskalets // Advances in Mechanical Engineering. Springer international Publishing, Switzerland, 2018 – p. 195-204.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв ведущего инженера АО «Компрессор», кандидата технических наук Валерия Александровича Четвертакова.

Указаны замечания:

1) Ни в тексте, ни на рисунках, изображающих исследуемые лопатки (рис. 1, 6), нет информации о параметрах лопатки.

2) Не приведен результат расчёта изменения собственной частоты по формуле (6).

2. Отзыв профессора кафедры «Основы конструирования машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктора технических наук Андриенко Людмилы Анатольевны.

Указаны замечания:

В работе автором приведены оригинальные математические разработки для контроля вибраций лопаток турбин. Однако, из автореферата не ясно, как разработка моделей на практике позволит повысить работоспособность лопаток.

3. Отзыв заместителя генерального директора ООО «Нева Технолоджи», кандидата технических наук Терешинной Наталии Михайловны.

Указаны замечания:

1) Норма Мизеса на странице 17 и кинетическая энергия на странице 18 обозначены одной и той же буквой.

2) Начальную точку вертикальной оси графика на рисунке 9 (страница 15) следовало бы сделать нулевой.

4. Отзыв профессора кафедры Теоретической и прикладной механики Математико-механического факультета Санкт-Петербургского университета, доктора физико-математических наук, профессора Бауэр Светланы Михайловны.

Указаны замечания:

1) Отсутствует какая-либо информация об исследуемых лопатках – в каких установках они используются?

2) При решении задач о вынужденных колебаниях не учтено демпфирование, а оно оказывает сильное влияние на результат расчёта.

5. Отзыв руководителя направления «Композитные материалы» ООО «Троицкий крановый завод», кандидата технических наук Васильева Романа Викторовича (на момент защиты отзыв имеется в электронном виде).

Указаны замечания:

1) Результаты расчёта собственных частот приводятся без объяснения, каким формам колебаний они соответствуют, т.е. какой вид деформации – кручение или изгиб – преобладает.

2) Не сделаны практические выводы по результатам построения вибрационной диаграммы (рис. 4, стр. 10).

Все отзывы являются положительными, в каждом отзыве указано, что автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются компетентными и авторитетными учёными в области исследования колебаний упругих тел и конструкций, а ведущая организация является одним из крупнейших научных центров в области механики сплошных сред, в котором работают такие авторитетные в данной области учёные, как академик РАН, д.т.н. Матвеев В.П., академик РАН, д.т.н. Барях А.А., к.ф.-м.н. Юрлова Н.А. и многие другие.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1) **предложена методика** расчёта вибраций турбинной лопатки, включающая в себя определение собственных частот, форм и динамических прогибов, на основе одномерной и двумерной моделей лопатки, а также оценку среднего уровня вибраций при воздействии высокоскоростных ударов капель жидкости, для чего используется впервые предложенное аналитическое выражение усреднённой кинетической энергии лопатки через спектральную плотность внешнего взаимодействия, учитывающее неопределённость объёмного распределения механических характеристик и внутреннее демпфирование в сложной упругой колебательной системе, частью которой является лопатка. Преимуществом перед методиками, использующими метод конечных элементов, является возможность учитывать влияние различных факторов и эффектов, проявляющихся при упругих колебаниях лопатки, а также проводить многовариантные расчеты с изменяющимися параметрами лопатки для нахождения оптимального решения.

2) **предложена методика** оценки напряжений турбинной лопатки, совершающей изгибные колебания, на основе одномерной и двумерной моделей, включающая в себя также оценку напряжений при воздействии высокоскоростного удара частицы жидкости. Преимуществом методики перед конечноэлементными являются алгоритмы решения задач – они реализуются в компьютерной математике, что делает подход менее требовательным к производительности процессора.

3) **предложена одномерная модель** длинной турбинной лопатки, совершающей изгибно-крутильно-продольные колебания, основным отличием которой от использовавшихся ранее является учёт предварительно напряжённой начальной конфигурации лопатки в связи с растяжением центробежной силой, что позволяет отыскать зависимости собственных частот от частоты вращения ротора (необходимые для построения вибрационных диаграмм), а также учёт сдвига и перекрёстных связей изгиба с кручением и растяжения с кручением,

что позволяет уточнить результат расчёта – значение первой изгибной частоты уменьшается на 20% по сравнению с результатом расчёта чисто изгибных колебаний, при этом разница с результатом, полученным для трёхмерного тела методом конечных элементов, составляет всего 3%.

4) **предложена методика**, позволяющая найти изменение основной собственной частоты изгибных колебаний лопатки вследствие эрозионного износа и тем самым оценить возможность появления опасных колебаний. В основе методики лежит впервые предложенная аналитическая формула, полученная при рассмотрении одномерной модели лопатки; добавка обусловлена малыми изменениями геометрических и инерционных характеристик поперечного сечения.

5) **предложена двумерная модель** короткой турбинной лопатки, совершающей изгибные колебания, основным отличием которой от использовавшихся ранее является учёт деформации лопатки в плоскости поперечного сечения благодаря введению дополнительного слагаемого в выражение, аппроксимирующее вектор перемещения. Преимуществом является возможность использовать различную аппроксимацию перемещений в зависимости от особенностей геометрии лопатки и учитывать тем самым характер деформации (изгибная, крутильная и т.д.).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1) предложен подход к исследованию вибраций турбинных лопаток, в основе которого лежит современная механика тонкостенных конструкций с использованием прямого тензорного исчисления с записью основных уравнений и соотношений в инвариантном виде;

2) выведены уравнения линейной механики стержней для изгибно-крутильно-продольных колебаний лопатки около напряжённого состояния, вызванного центробежной силой, учитывающие сдвиг и перекрёстные связи изгиба с кручением и растяжения с кручением;

3) разработана модель контакта капли и лопатки, позволяющая найти условия, при которых начинается эрозия;

4) предложен подход, позволяющий оценить средний уровень вибраций лопатки, подверженной высокоскоростным ударам капель жидкости.

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

1) разработаны механические модели в стержневой и оболочечной постановке, применимые для анализа динамики лопаток турбин с разным соотношением длины и размера поперечного сечения;

2) разработаны численные алгоритмы для проведения модального анализа, построения вибрационных диаграмм, расчёта вынужденных колебаний и прочности лопатки в программе Mathematica и Mathcad;

3) разработан подход, позволяющий найти условия начала эрозионного

изнашивания и оценить средний уровень вибраций лопатки, подверженной высокоскоростному воздействию частиц.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что при решении задач использованы адекватные математические модели лопатки, работоспособность которых обеспечивается корректным применением уравнений механики упругих стержней и оболочек, механики контактного взаимодействия и механики Лагранжа, а также использованием проверенных численных алгоритмов, реализованных в пакетах программ компьютерной математики.

Личный вклад соискателя состоит в:

- непосредственном участии в формулировке и постановке целей и задач диссертационного исследования;
- создании математических моделей длинной и короткой турбинных лопаток, основанных на теории стержней и оболочек;
- разработке численных алгоритмов решения поставленных задач;
- непосредственном участии в подготовке публикаций по теме диссертационного исследования и апробации результатов исследования на конференциях.

Диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842.

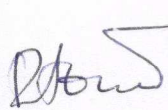
На заседании 27 апреля 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Москальцу А.А. ученую степень кандидата технических наук.


При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 8 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение учёной степени – 14, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д 002-075-02,
д.т.н.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002-075-02,
к.т.н.



 Полянский
Владимир Анатольевич

 Кучмин
Андрей Юрьевич

27.04.2021 г.