

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук



академик РАН

 А.А. Барях

18 марта 2021 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук  
о диссертационной работе Москалец Артема Анатольевича  
«Применение моделей различной размерности для оценки вибрации турбинных лопаток»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Диссертационная работа Москалец А.А. посвящена 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.

**Актуальность темы диссертационной работы** обусловлена тенденцией повышения требований к достигаемой мощности паровых турбин, что влечет за собой ряд проблем, наиболее существенными из которых являются обеспечение длительной работоспособности лопаток турбины и снижение вибрационных нагрузок путем отстройки рабочих режимов от резонансных с учетом различных факторов.

### Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа Москалец А.А. характеризуется последовательностью проведенных исследований, полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, формулируются цель и задачи работы. Показана научная новизна исследования и представлены основные положения, выносимые на защиту. В конце введения описаны структура диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации приведена общая техническая информация о лопатках турбин. Приведен обзор основных элементов конструкции, материалах, а также технологии изготовления и обработки лопаток. Подробно рассмотрены факторы, обуславливающие возникновение вынужденных колебаний и автоколебаний. Внимание уделено проектированию лопаток с повышенной вибрационной надежностью, что достигается отстройкой от резонансов при помощи вибрационных диаграмм. Описаны причины и следствия эрозионного изнашивания, а также способы борьбы с эрозией как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации.

**Глава вторая** посвящена рассмотрению турбинной лопатки как консольного прямолинейного естественно закрученного стержня. В основе подхода – дифференциальные уравнения линейной механики стержней. Предложена математическая модель длинной турбинной лопатки, совершающей изгибо-крутильно-продольные колебания в двух плоскостях, с предварительно напряженной начальной конфигурацией, обусловленной растяжением лопатки центробежной силой. Модель позволяет найти зависимости собственных частот колебаний лопатки от скорости вращения ротора и таким образом построить вибрационные диаграммы. Выведена аналитическая формула для поправки к первой собственной частоте колебаний, обусловленной малым изменением геометрических и инерционных характеристик сечения лопатки, вызванных эрозионным изнашиванием.

**В третьей главе** также рассматривается одномерная модель длинной турбинной лопатки, но используется вариационный подход и уравнения Лагранжа второго рода. Рассматриваются изгибные колебания, считается, что при этом линии центров масс и центров изгиба совпадают, а функции, описывающие инерционные и жесткостные характеристики лопатки заданы. Найдены значения собственных частот колебаний лопатки, получены соответствующие собственные формы, решена задача о вынужденных установившихся колебаниях лопатки, подверженной действию гармонически изменяющейся возмущающей силы.

**В четвертой главе** также используется вариационный подход, но применительно к короткой турбинной лопатке, в связи с чем используется двумерная модель – оболочка. Считается, что лопатка совершает изгибные колебания, но при этом поперечное сечение деформируется в своей плоскости. Использована двумерная модель оболочки – модель Кирхгофа. Геометрия лопатки описана как геликоидальная оболочка с поперечным сечением, представляющим собой прямоугольную полоску с меняющейся вдоль продольной координаты лопатки длиной и постоянной шириной. Решены задачи о собственных и вынужденных установившихся колебаниях лопатки. Получено распределение напряжения по Мизесу по всему объему конструкции.

**Пятая глава** посвящена моделированию каплеударной эрозии и расчету связанных с ней вибраций турбинной лопатки. Частые высокоскоростные удары капель жидкости могут вызывать вибрации лопатки. Очевидно, что эрозионный и вибрационный процессы взаимосвязаны. В данной главе предлагается подход, позволяющий определить условия, при которых начинается эрозионное изнашивание, и оценить средний уровень вибраций, происходящих в таких условиях. Для расчета вибраций предлагается аналитический подход, учитывающий неоднородное распределение свойств в сложных упругих колебательных системах и неопределенность механических и геометрических параметров материала. Такой системой является пакет лопаток, а сама лопатка является упругим телом, чьи характеристики определяются ее спектром колебаний.

Рассматривается контактное взаимодействие капли как упругого шара и лопатки как упругого полупространства. Принята гипотеза, согласно которой изнашивание начинается в момент появления пластических деформаций в теле лопатки. Данный способ позволяет найти скорость капли в момент удара, при которой максимальное значение напряжения вблизи площадки контакта становится равным пределу текучести.

**В заключении** диссертации сформулированы следующие основные результаты исследований:

- 1) Предложена математическая модель длинной турбинной лопатки, совершающей изгибо-крутильно-продольные колебания в двух плоскостях, с предварительно

напряжённой начальной конфигурацией, обусловленной растяжением лопатки центробежной силой. Модель представляет собой материальную линию, или линию Коссера. Модель учитывает сдвиг, инерцию вращения, депланацию, перекрёстные связи изгиба с кручением и растяжения с кручением. Получены зависимости собственных частот лопатки от скорости вращения ротора, построены вибрационные диаграммы. Составленная система обыкновенных дифференциальных уравнений решена методом конечных разностей при помощи компьютерной математики.

2) Предложена аналитическая формула поправки к первой собственной частоте длинной турбинной лопатки, обусловленной малым изменением геометрических и инерционных характеристик поперечного сечения вследствие эрозионного изнашивания. Формула получена путём введения малого параметра в систему обыкновенных дифференциальных уравнений линейной механики стержня и применения принципа взаимности работ в обобщённом виде.

3) Предложена математическая модель короткой турбинной лопатки, совершающей изгибные колебания. Модель, оболочка Кирхгофа, представляет собой материальную поверхность геликоидальной формы. Сечение лопатки представляет собой прямоугольник, ширина которого постоянна вдоль длины лопатки, а длина меняется по заданному закону. Модель помимо изгиба в двух плоскостях учитывает деформацию в плоскости поперечного сечения. Собственные частоты, формы и амплитуды вынужденных колебаний найдены с помощью вариационного подхода. В подробностях описаны детали алгоритма получения посредством компьютерной математики выражений кинетической и потенциальной энергии лопатки.

4) Поставлена и решена задача анализа напряженно-деформированного состояния турбинной лопатки, подверженной высокоскоростному удару частицы жидкости. Лопатка и частица жидкости и рассматривались как упругое полупространство и тело конечных размеров соответственно. Решение задачи контактного взаимодействия частицы жидкости и лопатки разыскивалось в виде, предложенном Папковичем и Нейбером. Получено распределение напряжения по критерию Мизеса вблизи области удара. Найдена скорость частицы во время удара, при которой контактные напряжения достигают предела текучести.

5) Поставлена и решена задача расчета среднего уровня вибрации турбинной лопатки, подверженной хаотичному воздействию частиц жидкости. Для этого был использован аналитический подход, позволяющий учесть демпфирование в материале и неоднородность распределения механических свойств и геометрических параметров между элементами сложной упругой колебательной системы, которой в данной задаче является венец с лопатками.

Все результаты были получены впервые и не имеют аналогов в работах других авторов.

### **Научная значимость работы**

1) Предложена методика расчёта вибраций турбинной лопатки, включающая в себя определение собственных частот, форм и динамических прогибов, на основе одномерной и двумерной моделей, а также оценку среднего уровня вибраций при воздействии высокоскоростных ударов капель жидкости. Методика построена на основе впервые полученного аналитического выражения усреднённой кинетической энергии лопатки через спектральную плотность внешнего взаимодействия, учитывает неопределенность 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) Разработана методика оценки напряжений турбинной лопатки, совершающей изгибные колебания, основанная на использовании одномерной и двумерной моделей, включающая в себя также оценку напряжений при воздействии высокоскоростного удара частицы жидкости.

Преимуществом методики перед конечноэлементными расчетами являются алгоритмы решения задач – они реализуются в компьютерной математике, что делает подход менее требовательным к производительности процессора.

3) Одномерная модель длинной турбинной лопатки, совершающей изгибающе-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.

Использование предложенной одномерной модели 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) Построена 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.).

Научная новизна работы состоит в разработке комплекса методик, позволяющих значительно упростить и ускорить процесс проектирования турбинных лопаток, увеличив количество рассмотренных вариантов, а также оценить влияние рабочих режимов на эксплуатационные характеристики лопатки, тем самым сделать более точным прогноз ее работоспособности при максимальных возможных мощностях работы турбины.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертации Москалец А.А. могут быть использованы при проектировании турбинных лопаток, которые являются конструкционной деталью паровых турбин ТЭС/АЭС, компрессоров газовых турбин и широко применяются в энергетическом, нефтегазовом секторах экономики, в автомобиле- и самолетостроении. Предложенные в диссертации математические модели могут быть применены в институтах РАН и вузах авиационного и машиностроительного профилей, таких как ЦАГИ, «ИМСС УрО РАН» - филиале ПФИЦ УрО РАН, ЮНЦ РАН, ПНИПУ, ИТМО, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургский государственный университет и ряде других промышленных предприятий АО «ОДК-Авиадвигатель», АО «ОДК-Пермские моторы» и т.д.

**Достоверность результатов**, полученных в работе, обеспечивается корректным применением уравнений механики упругих стержней и оболочек, механики контактного взаимодействия и механики Лагранжа, использованием проверенных численных алгоритмов, реализованных в пакетах программ компьютерной математики.

Диссертация и автореферат написаны грамотным научным языком, содержат необходимые иллюстрации. **Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации и полученные в диссертации результаты.

Диссертация хорошо **апробирована**. Основные результаты исследований опубликованы в 18 работах, включая 3 статьи в журналах из списка ВАК и 4 статьи в изданиях, индексируемых в Web of Sciences. Работа прошла аprobацию на конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Несомненным достоинством диссертационной работы Москалец А.А. являются последовательность, тщательность и аккуратность при проведении численных исследований, изложение работы ясным техническим языком. Все разделы диссертации демонстрируют практическую применимость предлагаемых методик, что придает значимость проделанной работе и перспективность в использовании при проектировании турбинных лопаток.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие **замечания**:

1. В работе предложены одно- и двумерные математические модели для оценки вибрационного напряженно-деформированного состояния турбинной лопатки, которые позволяют быстро проанализировать их механическое поведение при той или иной модификации. Было бы интересно сравнить результаты, полученные с помощью предложенных моделей с результатами, полученными при моделировании лопатки как трехмерного тела в пакетах программ типа ANSYS, ABAQUS и так далее. При этом было бы хорошо привести сведения по затратам времени, требования к вычислительной технике. Это позволило бы более ярко продемонстрировать удобство разработанных методик.

2. В диссертационной работе несколько раз упоминается, что «Поставленные задачи решаются с помощью компьютерной математики». Однако нигде в тексте диссертации не указано: какие пакеты программ для этого использованы. Правда, в автореферате упомянуто, что численные результаты модального анализа, расчета вынужденных колебаний и прочности лопатки были получены в пакетах Mathematica и Mathcad. В связи с этим возникает вопрос: почему необходимо было использовать два пакета программ, какие задачи решались в одном, какие в другом? Хорошо было бы упомянуть об особенностях применения данных пакетов программ и численной реализации разработанных алгоритмов.

3. В диссертации приведены графики и рисунки, демонстрирующие полученные численные результаты. Однако непонятно, какие были приняты при расчетах геометрические размеры конструкции и характеристики материала, из которого она изготовлена, поскольку в работе данные сведения отсутствуют. Данных сведений не удалось найти и в тексте авторефера. При этом интересно, во всех вариантах расчета лопатки были изготовлены из одного и того же материала, и как соотносились их геометрические размеры.

4. Следует обратить внимание на погрешности в оформлении работы (присутствие грамматических и стилистических ошибок в тексте):

Стр.8: «...где взаимодействием частицы жидкости и лопатки рассматривается как...»;

Стр. 8: «... основанный на интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнениях линейной механики стержней»;

Стр. 9: «По сравнению с одномерной моделью лопатки, в **данной главе** получаются гораздо более сложные выражения потенциальной и кинетической энергии

лопатки» видимо, подразумевается, что «По сравнению с одномерной моделью лопатки, при использовании двумерной модели получаются гораздо более сложные выражения потенциальной и кинетической энергии лопатки»;

Стр. 15: Рисунок 1.1. В подрисуночной подписи присутствует «3 – обод диска», однако на самом рисунке обозначения 3 нет;

Стр. 18 «... сравнивая результаты испытания гладких образцов и образцов с искусственным концентратором»;

Стр. 26 «... Соответствующие декремент колебаний называется механическим, его влияние...»;

Стр. 27 «... Между крутильным и изгибным колебанием есть сдвиг фаз...»;

Стр. 30 «Дан обзор основных элементах конструкции...»

и так далее.

Данный список можно продолжить, но следует отметить, что погрешности такого рода не влияют на суть выполненной работы и полученные результаты.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

### Заключение

Диссертация представляет собой завершенную 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 надежности 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».

Диссертационная работа рассмотрена на научном семинаре Отдела комплексных проблем механики деформируемого твердого тела «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, протокол заседания № 5/21 от 03.03.2021 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании Объединенного ученого совета ПФИЦ УрО РАН 09.03.2021 г. (протокол №2).

Директор «ИМСС УрО РАН» -  
филиала ПФИЦ УрО РАН  
академик РАН

Валерий Павлович Матвеенко

Ученый секретарь  
«ИМСС УрО РАН» -  
филиала ПФИЦ УрО РАН  
к.ф.м.н., доцент

Наталья Алексеевна Юрлова

Сведения о ведущей организации:  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)

Почтовый адрес:  
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1  
тел.: +7 (342) 237 84 61;  
e-mail: [mvp@icmm.ru](mailto:mvp@icmm.ru)  
Веб-сайт: <http://www.permsc.ru>