

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, д.т.н., профессора Гордеева Бориса Александровича на диссертацию **Москальца Артема Анатольевича** «*Применение моделей различной размерности для оценки вибрации турбинных лопаток*», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Диссертация Москальца А.А. посвящена проблеме прогнозирования вибраций турбинных лопаток. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечить надёжность лопатки на стадии проектирования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 138 наименований.

В **введении** обоснована актуальность, цель и задачи диссертационного исследования, сформулирована практическая значимость работы и представлены положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приведена общая техническая информация о лопатках турбин. Описаны основные элементы конструкции, даны сведения о материалах, а также о технологии изготовления и обработки лопаток. Подробно рассмотрены причины возникновения вынужденных колебаний и автоколебаний. Внимание также уделено проектированию лопаток с точки зрения вибрационной надёжности, а именно, отстройке от резонансов путём изучения вибрационных диаграмм. Описаны также особенности эрозионного изнашивания и способы борьбы с этим явлением.

Глава 2 посвящена одномерной модели лопатки. Описывается подход, основанный на интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнениях линейной механики стержней. Вначале даны основы теории упругих стержней – материальных линий. Математическая модель рассматривается по мере усложнения: вначале – изгибные колебания стержня без сдвига, далее вводятся в рассмотрение поперечный сдвиг и перекрёстные связи, учет которых приводит к продольно-изгибо-крутильным колебаниям стержня.

Независимо от сложности модели, в первую очередь проводится расчёт свободных колебаний с целью определения собственных частот и форм; затем – вынужденных.

В **главе 3** разработан вариационный метод расчета лопаток на базе одномерной модели. Подход основан на лагранжевой механике, он позволяет при решении задач о колебаниях перейти от дифференциальных уравнений в частных производных к системе ОДУ. Для этого выбирается некоторая аппроксимация изгибных перемещений лопатки. Выводятся выражения для потенциальной и кинетической энергии лопатки, после чего строятся глобальные матрицы жёсткости и инерции. Ставится задача на обобщенные значения, соответствующая свободным колебаниям. Далее рассматриваются вынужденные колебания.

Подход, описываемый в **главе 4**, также базируется на уравнениях Лагранжа, но уже применительно к двумерным моделям – оболочкам. Вначале даны основы лагранжевой механики классических оболочек. Последовательность действий аналогична, в целом, подходу, описанному в главе 3 – после построения глобальных матриц инерции и жёсткости решается задача о свободных колебаниях, а после определения обобщённых сил находятся амплитуды вынужденных колебаний. По сравнению с одномерной моделью лопатки, в данной главе получаются гораздо более сложные выражения потенциальной и кинетической энергии лопатки, что требует дополнительных действий при численном решении задачи.

**Глава 5** посвящена моделированию каплеударной эрозии. В данной главе рассматривается контактное взаимодействие капли и лопатки как упругого трёхмерного полупространства. В начале главы приведены сведения о решении пространственной контактной задачи. Из решения контактной задачи находятся условия, при которых начинается эрозия. Далее приведена теоретическая основа похода, позволяющая оценить средний уровень вибраций лопатки, и в конце главы результаты решения контактной задачи используются для вычисления среднего уровня вибрации.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

**Среди наиболее значимых с научной и практической точки зрения результатов работы Москальца А.А. стоит выделить:**

- методику расчёта колебаний, использующую одномерную модель длинной турбинной лопатки, описывающую изгибно-крутильно-продольные колебания с учётом предварительного растяжения центробежной силой и перекрёстных связей между различными деформациями, позволяющую также строить вибрационные диаграммы;
- методику расчёта колебаний, использующую двумерную модель короткой турбинной лопатки, совершающей изгибные колебания, учитывающую деформацию лопатки в плоскости поперечного сечения;
- аналитическую формулу, позволяющую оценить изменение основной изгибной собственной частоты в результате эрозионного износа.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы обеспечена строгостью применённых методов и разработанных математических моделей.

**Личный вклад автора** подтверждается научными публикациями (18 работ) в реферируемых российских журналах (3) и в изданиях, индексируемых в базе Scopus (5), а также участием в многочисленных конференциях всероссийского и международного уровня.

## **Замечания к работе:**

1. Продекларированная диссертантом в разделе «**Положения, выносимые на защиту**» методика предполагает разработку некоторых основных положений, следуя которым можно осуществлять расчет вибраций инженерным способом. Автор методику отождествляет с математической моделью длинной турбинной лопатки, совершающей изгибно-крутильно-продольные колебания в двух плоскостях, с предварительно напряжённой начальной конфигурацией, обусловленной растяжением лопатки центробежной силой. А где обоснование, что методика и модель тождественны? В общем случае это не так.

2. Изучаемые турбинные лопатки служат не для производства энергии, а для преобразования энергии струи пара в энергию вращения ротора. Поэтому представляется целесообразным в разделе «**Актуальность темы**» в предложении: «**одной из основных тенденций развития какой-либо установки, служащей для производства энергии, всегда является повышение ее мощности**» термин «**производство**» заменить на «**преобразование**».

3. Эрозионное изнашивание лопатки сложный процесс, контролируемый только путем остановки турбины и исследования микро-гидроударов капель. О микро-гидроударах капель о лопатку в диссертации сказано недостаточно полно.

4. В подписи к рисунку 2.2 (он же рисунок 1 автореферата) сказано, что «**Турбинная лопатка в системе координат: а – 3D-модель, б – корневое сечение**». Здесь **3D-модель** предполагает изготовление лопатки на некотором оборудовании, но на рисунке не обозначены даже ее размеры.

**Заключение:** в диссертационной работе Москальца А.А. предложена комплексная методика оценки вибраций и напряжений в турбинных лопатках, которая может использоваться на предприятиях при проектировании лопаток.

Приведенные замечания не снижают ценность работы и не затрагивают ее основные результаты и выводы. Результаты исследования имеют большую научную и практическую ценность, а сама диссертация является завершённой научно-квалификационной работой. Текст диссертации логично выстроен и

грамотно изложен. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты работы изложены в реферируемых научных журналах и материалах научных конференций.

Диссертационная работа **Москальца Артема Анатольевича** соответствует специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры». Диссертационная работа отвечает критериям, перечисленным в постановлении правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018 г., с изм. от 26.05.2020 г.) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Москалец А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
лаборатории волновой динамики,  
экспериментальной механики и виброзащиты машин  
Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»,

 15.03.2021г.

Б.А. Гордеев

603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85,

Институт проблем машиностроения РАН

Телефон: +7 (831) 432-03-00

E-mail: [imsh@mts-nn.ru](mailto:imsh@mts-nn.ru)

Подпись Гордеева Бориса Александровича удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМ РАН,

к.т.н., доцент

Е.А. Мотова

