

ОТЗЫВ

официального оппонента, к.т.н., доцента Шалобаева Евгения Васильевича 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 состоит из введения, пяти глав и заключения. Список использованных источников содержит 138 наименований.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа посвящена Москальца А. А. проблеме прогнозирования колебаний лопаток турбин. Из-за различных переменных воздействий могут возникать опасные вибрации, а эксплуатация в таком режиме приведёт к более быстрому усталостному разрушению. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечивать надёжность лопатки на стадии проектирования путём анализа её возможных колебаний, возникающих под действием различных факторов. Основная цель такого расчёта – выявить возможные резонансные режимы и дать рекомендации о необходимости изменения конструкции лопатки.

Общая характеристика работы

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

Первая глава содержит основную информацию о конструкции, материалах, технологии изготовления и обработки турбинных лопаток. Даны сведения о проблемах, возникающих при их эксплуатации – вибрациях и эрозии, – о их природе и о способах борьбы с ними.

Во второй главе разрабатывается одномерная модель лопатки. Используется подход, в основе которого лежат обыкновенные дифференциальные уравнения линейной механики стержней. В начале главы приведены основы теории упругих

стержней. Далее модель рассматривается в процессе развития (и усложнения): вначале это модель, описывающая лишь изгибные колебания стержня, далее добавляются различные эффекты, в результате чего автор приходит к «полной» одномерной модели, описывающей совместные изгибно-крутильно-продольные колебания, которую затем «развивает», учтя напряженную отсчётную конфигурацию, что позволяет в итоге построить вибрационные диаграммы. Далее выведена формула, позволяющая вычислить изменение основной собственной частоты изгибных колебаний, а в конце главы вычислено напряжение изгиба. В данной главе довольно подробно описаны некоторые нюансы использования метода конечных разностей, которым решается часть задач.

Третья глава также посвящена одномерной модели, но используется уже вариационный подход, основанный на лагранжевой механике и методе Ритца. В начале главы даны общие сведения о вариационном исчислении и о приближённых методах, приведён пример простейшей вариационной задачи. В данной главе рассматриваются изгибные колебания лопатки. Выбирается аппроксимация перемещений, выводятся выражения потенциальной и кинетической энергии, далее строятся глобальные матрицы жёсткости и инерции. Решаются задачи о свободных и вынужденных колебаниях.

В четвёртой главе также описывается вариационный подход и рассматриваются изгибные колебания, но уже короткой лопатки, в связи с чем используется двумерная модель, или оболочка. В начале главы приведены основы лагранжевой механики классических оболочек. Подход аналогичен описанному в предыдущей главе: после получения матриц инерции и жёсткости находятся собственные частоты и формы, а затем – амплитуды вынужденных колебаний. Подробно описан процесс вывода выражений потенциальной и кинетической энергии в конкретной системе компьютерной математики, в которой решено большинство задач диссертационной работы. В конце главы дана оценка напряжённого состояния лопатки с помощью напряжений по Мизесу.

Пятая глава посвящена оценке напряжённо-деформированного состояния лопатки при эрозии и расчёту вибраций при воздействии частиц. В начале главы

описано решение пространственной задачи теории упругости, дано решение в перемещениях, используемое далее при решении задачи контакта лопатки и капли жидкости. Вычисляются напряжения по Мизесу, далее находится скорость частицы, при которой напряжения вблизи области взаимодействия достигают предела текучести (принята гипотеза, согласно которой именно в такой ситуации начинается эрозионное разрушение). Далее выводится выражение усреднённой кинетической энергии лопатки как элемента системы колеблющихся лопаток, в которое входит спектральная плотность внешнего взаимодействия; с помощью этого выражения в конце главы получена формула «средней» амплитуды колебаний лопатки.

В **заключении** приведены результаты работы.

Обоснованность выводов, достоверность результатов

По теме диссертационного исследования опубликовано 18 работ, из которых 5 – в сборниках материалов научных конференций, входящих в Scopus, 3 – в журналах, включенных в перечень ВАК. Результаты работы докладывались на различных конференциях, семинарах и симпозиумах. Обоснованность выводов и достоверность полученных результатов обеспечена применением известных положений теории упругости, теории колебаний, вычислительной механики и математики.

Научная новизна, практическая ценность

Научной новизной обладают уравнения линейной механики стержней для изгибо-крутильно-продольных колебаний лопатки с напряжённой в результате растяжения центробежной силой начальной конфигурацией, учитывающие сдвиг и перекрёстные связи изгиба с кручением и растяжения с кручением. Разработанная модель обладает практической ценностью, поскольку методика на основе этой модели позволяет строить вибрационные диаграммы, а также исследовать влияние параметров лопатки на ее частотные характеристики.

Замечания к работе

1. Использованная в главе 4 геликоидальная модель короткой турбинной лопатки не совсем корректна в том смысле, что сечения таких лопаток (например, лопаток газовых турбин) могут быть не слишком похожими на тонкие прямые полоски – скорее, это изогнутые полоски, причём, переменной толщины.

2. Автор настаивает на преимуществе предлагаемой одномерной модели, которое заключается в том, что можно исследовать влияние различных параметров лопатки на ее вибрационные характеристики. Однако, судя по описанию алгоритмов расчёта, при изменении сечений придётся обрабатывать новые массивы точек, описывающих профиль, и такая задача представляется довольно длительной.

3. Не уделено внимание обоснованию выбора численных методов – в частности, не указана причина выбора конкретного конечно-разностного шаблона, использованного для аппроксимации дифференциальных уравнений теории стержней.

4. В п. 3 положений, выносимых на защиту, сказано о разнице в значениях первой частоты длинной лопатки, полученных методом конечных элементов и методом, предложенным в диссертационной работе, однако, сами значения далее не приведены.

Заключение

Несмотря на приведенные замечания, диссертационная работа Москальца Артема Анатольевича обладает значительной научной новизной и практической ценностью. Диссертация представляет собой завершённый научный труд. Текст изложен грамотно и структурированно. Публикации и автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» и удовлетворяет критериям, указанным в «Положении о присуждении ученых степеней», а её автор Москалец Артем Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата

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

Официальный оппонент, кандидат технических наук,
доцент,
доцент факультета проектной инженерии
и компьютерной техники ФГАОУ ВО «НИУ ИТМО»



Е.В. Шалобаев

15 марта 2021 г.

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49



ПОДПИСЬ Шалобаев Е.В.
НАЧАЛЬНИКА ОК ИТМО
УСПЕНСКАЯ О.Р.