

На правах рукописи



Хоанг Динь Кыонг

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЛЬНЫХ ТУРБОМАШИН С
РАССТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ**

1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского»

**Научный
руководитель:**

Репецкий Олег Владимирович,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий

Левин Анатолий Алексеевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук», отдел теплосиловых систем, ведущий научный сотрудник

**Ведущая
организация:**

Акционерное общество «Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения»

Защита состоится «17» декабря 2024 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.271.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Ленина, д.11., корпус 2, ауд. 2-301, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Байкальского государственного университета.

Полный текст диссертации, автореферат диссертации и отзыв научного руководителя размещены на официальном сайте Байкальского государственного университета по адресу: <http://bgu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Т. И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На практике изменение геометрических форм рабочих лопаток турбомашин всегда имеет место в реальных конструкциях из-за технологии изготовления, дефектов сборки, износа при эксплуатации и других факторов. Все эти малые отличия лопаток называются расстройкой параметров. В настоящий момент множество специалистов из разных стран (Германия, США, Китай, Франция, Великобритания, Испания, Италия и в др. научных центрах) тщательно изучают расстройку параметров конструкций турбомашин от разнообразия геометрических форм лопаток. Наиболее известные из них: J. A. Baek, V. Beirrow, M. P. Castanier, D. J. Ewins, D. M. Feiner, Y. Han, H. Irretier, Y. Kaneko, T. Klauke, S. H. Lim, E. P. Petrov, A. J. Rivas-Guerra, H. She, D. S. Whitehead, C. U. Waldherr, Y. J. Yan, J. Yuan и другие. Данный подход также развивается в России, им посвящены исследования ученых: О. В. Репецкого, А. И. Жужукина, А. И. Ермакова, М. Ш. Нихамкина, В. С. Залужского, И. Л. Гладкого, М. В. Пивоварова и их соавторов. Как следует из выше представленных работ, фактически отсутствует численная оценка ресурсных характеристик таких сложных механических изделий, как радиальные рабочие колеса турбомашин. Также практически не представлен численный анализ чувствительности колебаний роторов турбомашин с учетом вращения и температуры. Кроме того, практически не изучена преднамеренная расстройка радиальных рабочих колес.

В этой связи разработка математических моделей, численных методов и программного обеспечения для анализа прочностных характеристик высоконагруженных элементов радиальных роторов турбомашин с расстройкой параметров является актуальной научной задачей. Комплексное исследование прочностных характеристик данных механических систем с расстройкой параметров играет важную роль при проектировании новых турбомашин для авиационного, химического, транспортного и энергетического машиностроения, а также правильной оценки и увеличения ресурса уже работающих конструкций.

Целью диссертационной работы является математическое моделирование и анализ прочностных характеристик радиальных турбомашин с использованием численных методов и комплексов программ на основе метода конечных элементов (МКЭ), а также анализ ресурса рабочих колес от воздействия расстройки параметров с учетом конструктивного дисбаланса и чувствительности.

В соответствии с целью выделены следующие **задачи**:

- 1) построение основных алгоритмов метода конечных элементов для численного анализа собственных колебаний, чувствительности и долговечности лопаток радиального рабочего колеса турбомашин;
- 2) применение и развитие МКЭ, численных алгоритмов и их реализация в виде программных комплексов для исследования чувствительности собственных колебаний конструкций с учетом вращения и температуры и анализа ресурсных характеристик;
- 3) оценка вариантов расчетов и разработка рекомендаций конструкторам энергетических и транспортных турбомашин по повышению проектной и эксплуатационной надежности элементов радиальных роторов турбомашин при проектировании и доводке новых или работающих изделий.

Объектом исследования являются модельные и реальные радиальные рабочие колеса с учетом расстройки параметров на примере рабочего колеса фирмы «Schiele» AG, специализирующейся на производстве агрегатов для химической промышленности и вентиляционного оборудования.

Предметом исследования является влияние преднамеренной расстройки параметров, вызванной несовершенством технологического изготовления, геометрией, дефектами монтажа, эксплуатационными и (или) другими изменениями на динамические характеристики и долговечность радиальных рабочих колес турбомашин.

Методы исследования. Выбран метод конечных элементов (МКЭ) для исследования собственных колебаний, анализа чувствительности конструкций, а также долговечности радиальных рабочих колес турбомашин. В диссертационной

работе применены теория упругости, теория колебаний, численные методы механики деформируемого твердого тела.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными данными, сравнением с аналитическими решениями и численными данными других авторов.

Научная новизна соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам:

Пункт 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

1. Предложена, верифицирована и развита расчетная модель на основе МКЭ для анализа чувствительности радиальных рабочих колес с учетом вращения и температуры.

2. Модифицирована математическая модель трапециевидного спектра нагружения лопаток и предложена расширенная схема распределения нагрузки при проходе соплового возбуждения от парциальности подвода пара или газа для исследования динамических характеристик и долговечности радиальных рабочих колес турбомашин.

Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

3. Создан комплекс оригинальных проблемно-ориентированных программ (SENS_RAD и RES_RAD) для исследования прочностных характеристик высоконагруженных элементов радиальных роторов турбомашин, где использован ряд алгоритмических решений с помощью программ SOLIDWORKS, ANSYS и MATLAB для моделирования режимов вибрации и их чувствительности к изменениям степени деформации радиальных лопаток и расчета многоциклового усталостной долговечности радиальных рабочих колес турбомашин.

Пункт 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

4. Предложена и применена оригинальная математическая модель конструктивного дисбаланса для исследования лопаток с расстройкой радиального рабочего колеса и анализа их ресурса от преднамеренной расстройки параметров. Определена основная закономерность в изменении массы основного диска от количества и глубины нарезных каналов в одном секторе колеса, исследовано влияние изменения геометрических и механических характеристик, как элементов расстройки параметров для увеличения долговечности.

5. Выполнен численный анализ долговечности и разработаны рекомендации для конструкторов энергетических и транспортных турбомашин по увеличению или продлению ресурсных характеристик при проектировании новых изделий или их эксплуатации с учетом преднамеренной расстройки параметров на основе блочных моделей расстройки.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование численных методов, алгоритмов и конструктивных моделей для расчета прочностных характеристик высоконагруженных элементов радиальных роторов турбомашин, в том числе с расстройкой параметров;

2. Комплекс программ (SENS_RAD и RES_RAD), предназначенных для анализа чувствительности конструкций и расчета долговечности радиальных рабочих колес турбомашин с трапециевидным спектром нагружения лопаток;

3. Результаты численных исследований влияния на ресурсные характеристики количества и глубины нарезных каналов на основном диске, изменения геометрических и механических характеристик деталей колеса и других параметров;

4. Исследование расстройки параметров элементов рабочего колеса с учетом конструктивного дисбаланса и применения блочных моделей.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии расчетных моделей, использовании численных методов и комплексов программ на основе метода

конечных элементов для исследования собственных колебаний, анализа чувствительности, статических и динамических напряжений, а также долговечности радиальных рабочих колес турбомашин.

Практическая значимость работы. Создан комплекс оригинальных проблемно-ориентированных программ для исследования прочностных характеристик высоконагруженных элементов радиальных роторов турбомашин, где использован ряд алгоритмических решений с помощью программ SOLIDWORKS, ANSYS и MATLAB. Данный комплекс программ позволяет уменьшить требуемые компьютерные затраты (память, быстродействие) и тем самым снизить трудоемкость моделирования, ускорить процесс проектирования и обеспечить продление эксплуатации радиальных колес. Определены закономерности в изменении массы основного диска от количества, глубины нарезных каналов в одном секторе колеса и их ресурса с учетом массово-сбалансированной конструкции. Результаты выполненного анализа по различным видам преднамеренной расстройки позволяют использовать их для оценки возможных вариантов при проектировании или эксплуатации радиальных рабочих колес турбомашин в области энергетического, нефтехимического и транспортного машиностроения.

Реализация результатов работы. Материалы и результаты диссертации внедрены и используются в учебно-научном процессе на основе комплекса программ и методик для анализа радиальных рабочих колес на энергетическом факультете Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, в институте авиационного машиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета и в Иркутском государственном университете путей сообщения, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутский ГАУ, п. Молодёжный, 2021-2023); Всероссийской научно-технической конференции «Энергообеспечение АПК», (Орловский ГАУ, Орел, 2021); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы устойчивого развития агропромышленного комплекса» (Иркутский ГАУ, Молодёжный, 2022); IV International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of the Energy Complex: Physical Processes, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection» (Москва, 2022 г.); XV International Scientific Conference «State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2022» (Ростов-на-Дону, 2022); Национальном форуме с международным участием «Цифровые технологии в образовании, науке и сельском хозяйстве» (Иркутский ГАУ, Молодёжный, 2023); научно-практической конференции «Научно-исследовательская деятельность аспирантов в решении приоритетных задач развития агропромышленного комплекса» (Иркутский ГАУ, Молодёжный, 2023); международной научно-практической конференции «Климат, экология и сельское хозяйство Евразии» (Иркутский ГАУ, Молодёжный, 2021-2024); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цифровизация: Теория и Практика» (БГУ, Иркутск, 2023); региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов «Системный анализ и математическое моделирование» (БГУ, Иркутск, 2024); International Conference on Simplicity and Complexity in SMART Automatics and Energy Systems «SMART-SYSTEMS» (Владивосток, 2024); Всероссийской научно-практической конференции для преподавателей и научных сотрудников «Цифровые технологии и математическое моделирование в науке, образовании и производстве» (Иркутский ГАУ, Молодёжный, 2024). Автор получил диплом II степени международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» и стипендию Губернатора Иркутской области (Иркутск, 2021, 2022 гг.)

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 30 научных работах, в том числе 11 публикаций в изданиях из

списка ВАК, из них 4 – по специальности 1.2.2; 3 публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 134 наименований. Общий объем работы составляет 131 страница, которые содержат 20 таблиц, 71 рисунок и 3 приложения.

Личный вклад автора. Результаты, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, цель исследования, задачи и методы их решения, представлена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе описан обзор численных исследований прочности и долговечности высоконагруженных элементов радиальных роторов турбомашин с расстройкой параметров. Рассмотрены способы введения преднамеренной расстройки, изученные разными авторами и основные результаты их численных и экспериментальных исследований влияния расстройки параметров. Представлены численно-экспериментальные методы исследования расстройки параметров радиальных рабочих колес турбомашин.

Во второй главе выполнены разработка математических моделей и развитие численно-экспериментальных методов исследования прочностных характеристик элементов радиальных роторов турбомашин. Также глава содержит описание сущности и основ применения метода конечных элементов (МКЭ) в технике, основные принципы и алгоритмы программной реализации МКЭ. Подобный анализ выполнен на примере радиального рабочего колеса с 10-ю лопатками. Моделирование трехмерной модели (3D) методом конечных элементов представлено на рисунке 1.

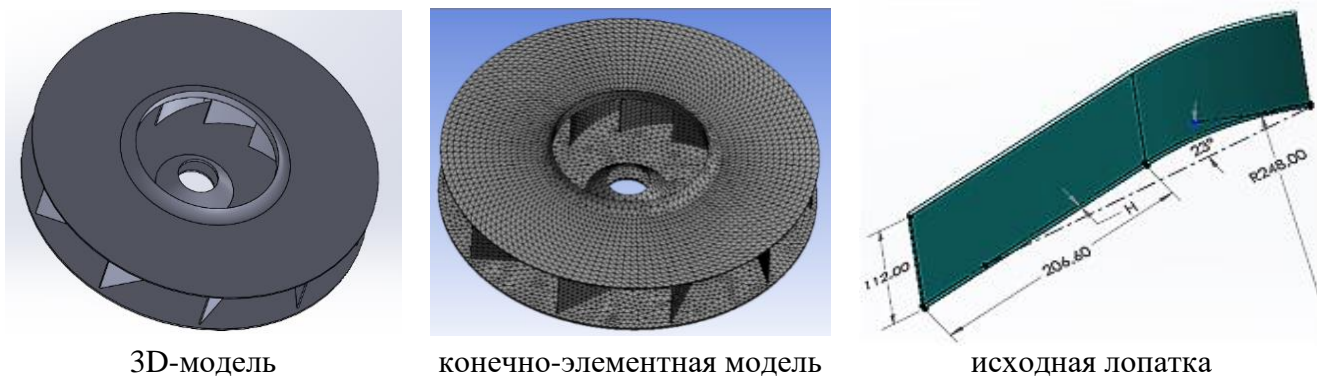


Рис. 1. Радиальное рабочее колесо с 10-ю лопатками

Уравнения движения с использованием метода конечных элементов для статики и свободных колебаний могут быть представлены в следующем виде:

$$(K_E + K_G + K_R)\delta = F_\Omega + F_T + F_G, \quad (1)$$

где δ – вектор перемещений, K_E – матрицы жесткости, K_G – матрица геометрической жесткости, зависящая от скорости и температуры, K_R – дополнительная матрица жесткости, возникающая в результате вращения, F_Ω, F_T, F_G – векторы, соответствующие силам вращения, температуры и давления газа соответственно.

В случае свободной вибрации:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + (K_E + K_G + K_R)\delta = 0, \quad (2)$$

где M – матрица массы, C – матрица демпфирования.

Согласно классическому подходу, линейное изменение температуры не создает напряжение в стержне и практически не создает напряжение в пластине (за исключением зоны заделки). При увеличении температур в узлах сетки конечных

элементов или перепада температур между верхними и нижними поверхностями, пластина увеличивает свою длину и расширяется к корневому сечению. Также наблюдается интенсивный изгиб в плоскости наименьшей жесткости. В соответствии с этим критерием, квадратичный закон изменения температуры применяется для решения задачи исследования влияния на статические и динамические характеристики радиальных рабочих колес турбомашин. На основе метода конечных элементов впервые разработана математическая модель для анализа чувствительности радиальных рабочих колес турбомашин к вращению и температуре. По высоте радиальных лопаток выдерживался квадратичный закон распределения температуры (рис. 2).

Квадратичный закон изменения температуры имеет следующий вид:

$$T = T_{\max} x^2 / (b / 2)^2, \quad (3)$$

где T – температура нагрева в конкретной точке, T_{\max} – максимальная температура нагрева при тестировании, x – расстояние от середины до края лопатки, b – ширина (хорда) лопатки.

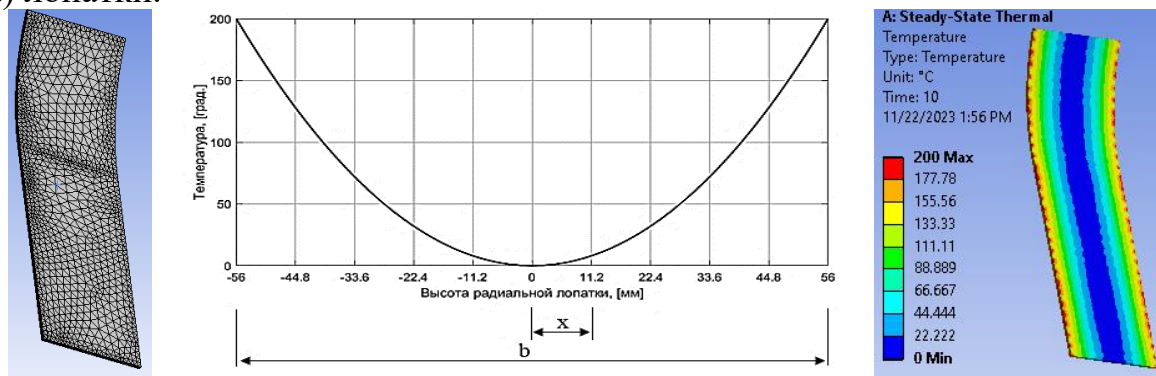


Рис. 2. Модель распределения температуры по хорде радиальных лопаток

Также в данной главе предложена математическая модель динамического возбуждения радиальной лопатки от парциальности подвода пара или газа, характеризующаяся трапециевидным спектром нагружения при проходе сопловой решетки статора.

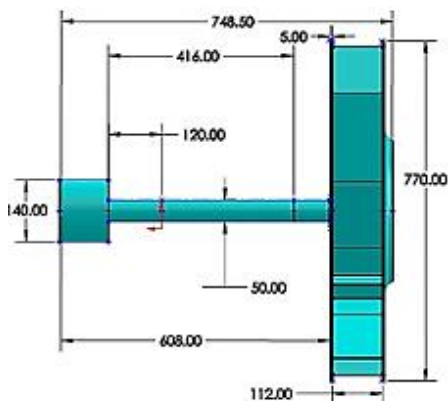


Рис. 3. Чертеж радиального рабочего колеса с валом

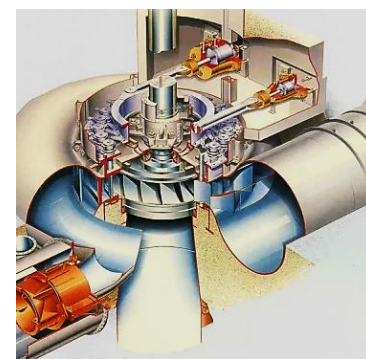
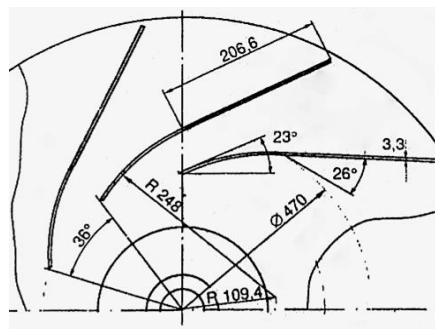


Рис. 4. Радиальный ротор турбомашин

Лопатка возбуждается через сопловые лопатки (по всей длине лопаток). Уравнение движения рабочего колеса на основе МКЭ под воздействием внешней нагрузки может быть записано в виде:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F. \quad (4)$$

Для предложенного автором типа трапециевидного распределения нагрузки при проходе радиальной лопатки через сопло, спектр возбуждения имеет вид:

$$F \approx \frac{2F_z}{\pi\nu} \sin(\nu\mu\pi) \frac{\sin(\pi\nu/2)}{\pi\nu/2}, \quad (5)$$

где ν – гармоники возбуждения, μ – расстояние между лопатками статора, F_z – аэродинамическая или газовая нагрузка, которая распределяется на каждую лопатку, F – динамическая нагрузка (спектр возбуждения).

Нагрузка F_z определяется в виде:

$$F_z = F_L \cos(\psi_r - \delta_r - \alpha) - F_D \sin(\psi_r - \delta_r - \alpha), \quad (6)$$

здесь F_L, F_D – соответственно, подъемная сила и сила сопротивления, α – угол закрутки лопатки, δ_r – угол между хордой и направлением скорости течения, ψ_r – угол установки лопатки по радиусу относительно корня. Все параметры определяются из чертежа радиального рабочего колеса (рис. 3).

Подъемная сила F_L может быть представлена в виде уравнения (7) и определена:

$$F_L = L(1 + 0,05 \cos(\varphi) + 0,025 \cos(2\varphi)), \quad (7)$$

Сила сопротивления F_D может быть представлена:

$$F_D = L(1 + 0,005 \cos(\varphi) + 0,0025 \cos(2\varphi)), \quad (8)$$

где первый член L представляет собой статическую часть, а $\varphi = z \int_0^t \Omega dt$ – фаза периодического соплового возбуждения, z – число сопел; $\Omega = \Omega_0 + \beta t$ – переменная угловая скорость ротора, где Ω_0 – начальная угловая скорость ротора, β – угловое ускорение ротора, t – время.

Пример радиального ротора турбомшины представлен на рисунке 4, а модель трапециевидного спектра нагружения лопатки для оценки динамических характеристик и долговечности радиального рабочего колеса разработана и изображена на рисунке 5.

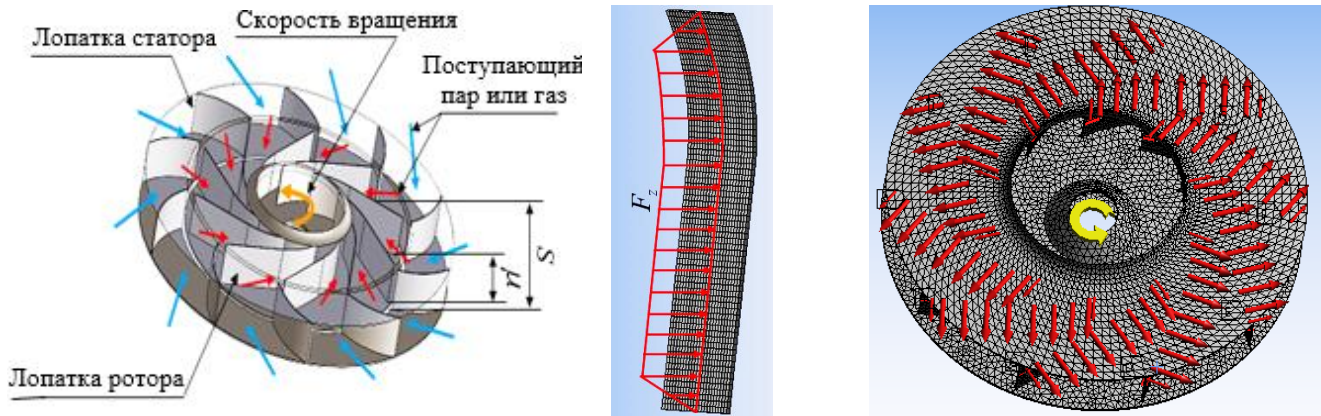


Рис. 5. Модель трапециевидного спектра нагружения лопатки радиального рабочего колеса

Для анализа проблемы влияния производственных допусков и износа в процессе эксплуатации, в данной главе анализируется вид расположения лопаток с расстройкой параметров на уровне блочного расположения лопаток (блочная модель). Процесс исследования радиальных рабочих колес заключается в вводе преднамеренной расстройки параметров для управления ресурсом и обеспечения требуемого уровня прочности, надежности и долговечности радиальных турбомашин. Следует отметить, что величина дисбаланса расстроенной системы играет важную роль на стадиях проектирования и доводки.

При анализе величины дисбаланса расстроенной системы масса радиальной лопатки рассчитывается как:

$$m_i = m_0 + \Delta m_i, \quad (9)$$

где m_i – масса i -й радиальной лопатки, m_0 – среднее значение масс радиальной лопатки диска с лопатками, Δm_i – отклонение массы i -й радиальной лопатки.

Величину дисбаланса лопаточного диска U можно рассчитать по формуле:

$$U = R_0 \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \Delta m_i \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \Delta m_i \sin \theta_i \right)^2}, \quad (10)$$

где θ_i – это угол, соответствующий положению i -й лопатки по окружности, который измеряется от первой лопатки. Символ R_0 представляет собой расстояние между центрами тяжести исходной и расстроенной системы.

Максимальный коэффициент увеличения амплитуды γ связывает максимальное перемещение расстроенной системы с максимальным перемещением настроенной системы и имеет формулу:

$$\gamma = \frac{\delta_{\text{расс. (максимум)}}}{\delta_{\text{настр. (максимум)}}}. \quad (11)$$

Максимальный коэффициент увеличения амплитуды колебаний по D.S. Whitehead имеет вид:

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{N}), \quad (12)$$

где N – число лопаток в колесе.

Для того чтобы минимизировать величину дисбаланса расстроенной системы с целью снижения максимального коэффициента увеличения амплитуды в данном разделе разработаны два подхода расположения лопаток с преднамеренной расстройкой параметров по определенным законам на уровне блочной модели. При первом подходе расстроенные лопатки расположены в чередующемся порядке (рис. 6).

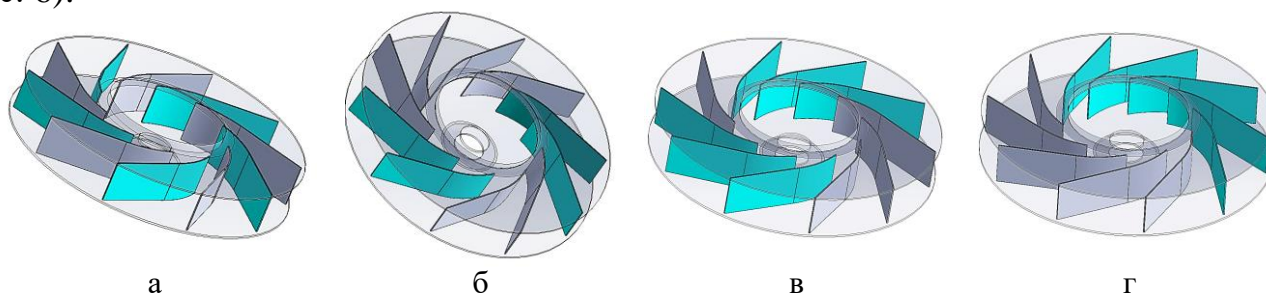


Рис. 6. Варианты блочных моделей с расположением лопаток в чередующемся порядке (а – первая; б – вторая; в – третья; г – четвертая)

При втором подходе расстроенные лопатки расположены в блочной модели с симметричным расположением по окружности колеса. Каждая пара лопаток одинаковых размеров симметрично расположена в блочной модели (рис. 7).

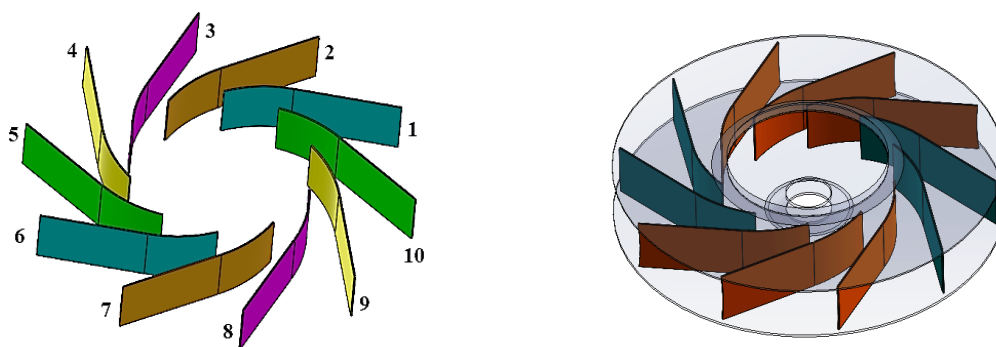


Рис. 7. Вариант исследования блочной модели с учетом симметричного расположения лопаток по окружности колеса

В данной главе, также представлены блок-схема и алгоритм расчета в рамках комплекса оригинальных проблемно-ориентированных программ для исследования прочностных характеристик радиальных роторов турбомашин. Авторские программы зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Первая программа «SENS RAD» разработана для моделирования режимов вибрации и их чувствительности к изменениям степени деформации радиальной лопатки и покрывного диска рабочего колеса на основе метода конечных элементов, в котором используется ряд алгоритмических решений с использованием программ SOLIDWORKS, ANSYS и MATLAB. Вторая программа «RES RAD» разработана для расчета многоциклового усталостной долговечности радиальных рабочих колес турбомашин, где использован ряд алгоритмических решений с помощью программ MATLAB и ANSYS.

В третьей главе выполнена верификация собственных частот колебаний на тестовых моделях пластин и академического радиального рабочего колеса с 34-мя

прямоугольными лопатками. Результаты исследования модельных конструкций направлены на изучение прочностных характеристик высоконагруженных элементов реальных радиальных роторов транспортных и энергетических турбомашин на примере реального радиального рабочего колеса фирмы «Schiele» AG (Германия).

В ходе исследования чувствительности собственных колебаний лопаток с учетом вращения от нуля оборотов до 60 1/с и неравномерного нагрева лопаток $T = 0...200^{\circ}C$ выявлено, что зона снижения частот колебаний (синий цвет) увеличивается в середине входной кромки лопаток (рис. 8). Данные результаты показывают, что середина входной кромки лопаток испытывает большую степень деформации с учетом суммарного вращения и неравномерного нагрева лопаток.

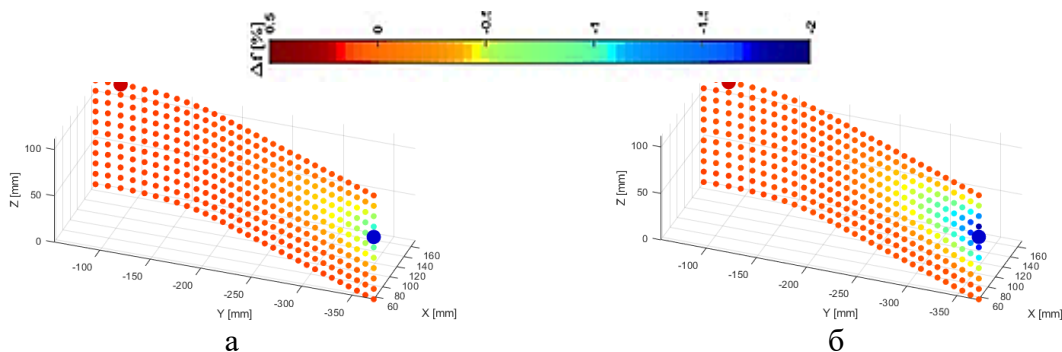


Рис. 8. Анализ чувствительности лопаток радиального рабочего колеса (а – без учета вращения и температуры; б – с учетом вращения и температуры)

Для того чтобы понять негативное влияние на работоспособность конструкции от середины входной кромки лопаток при анализе чувствительности конструкций, в данной главе был исследован режим разгона колеса от нуля оборотов до 60 1/с за 10 секунд. Применена модель трапециевидного спектра нагружения лопаток для исследования динамических характеристик и долговечности радиального рабочего колеса.

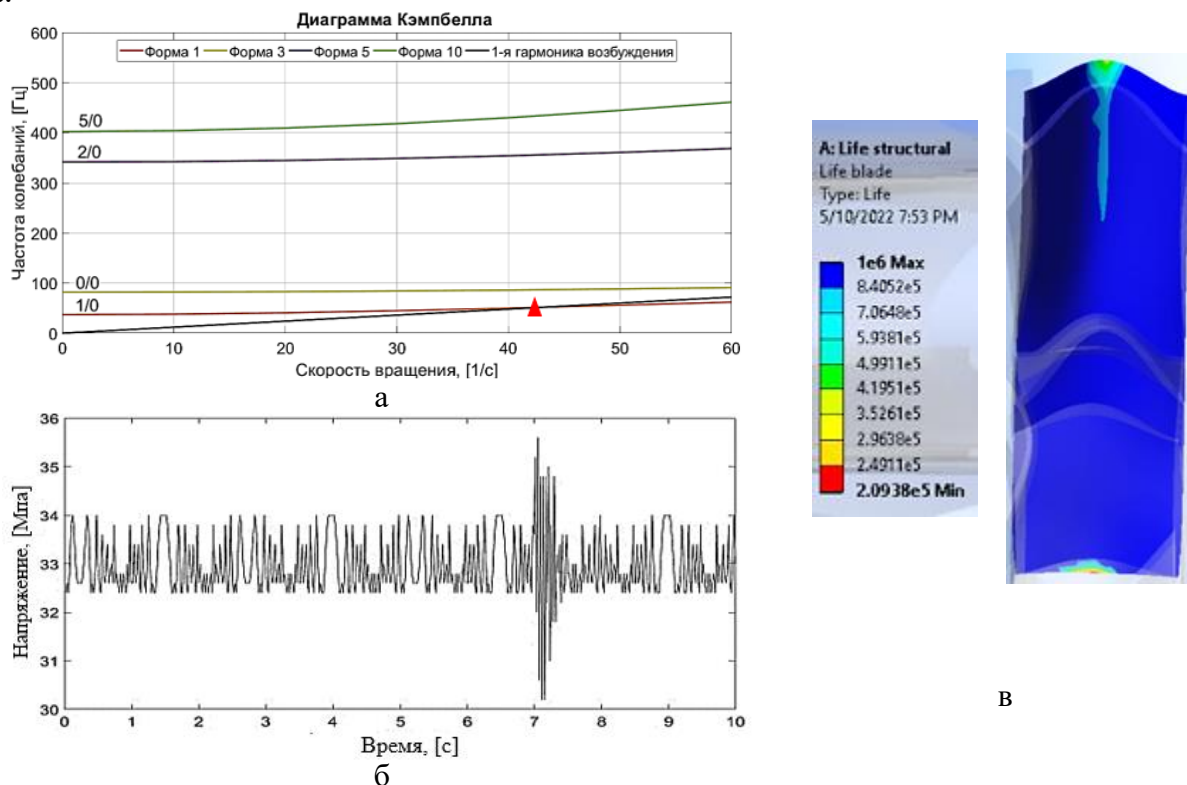


Рис. 9. Расчет прочностных характеристик радиального рабочего колеса (а – диаграмма Кэмпбелла; б – динамическое напряжение; в – долговечность)

Согласно результату расчета на рисунке 9б, динамическое напряжение повторяется периодически через каждые 2,5 секунды, но быстрее изменяется в диапазоне от 7 до 7,5 секунды. В участке отклика динамического напряжения наблюдается резонанс на 1-й гармонике возбуждения (диаграмма Кэмпбелла или

резонансная диаграмма, рис. 9а). При рассмотрении рисунка 9в следует отметить, что максимальное количество циклов работы до разрушения рабочего колеса составляет $1,0 \cdot 10^6$. Минимальное количество циклов радиального рабочего колеса – $2,0938 \cdot 10^5$. Таким образом, радиальные лопатки колеса могут иметь разрушение при достижении $2,0938 \cdot 10^5$ циклов на середине входной кромки радиальных лопаток.

В четвертой главе разработаны рекомендации для конструкторов энергетических и транспортных турбомашин при проектировании новых рабочих колес путем введения преднамеренной расстройки параметров.

Вначале ресурсные характеристики радиального рабочего колеса рассмотрены на уровне блочных моделей с одинаковыми лопатками при изменении толщины всех лопаток: вариант № 1 с уменьшением толщины лопатки на 10%, вариант № 2 с увеличением толщины лопатки на 10%. Следует отметить, что изменение толщины лопаток будет влиять на долговечность лопаток радиального рабочего колеса. Также наблюдается разрушение радиальных лопаток колеса на середине входной кромки радиальных лопаток. В соответствии с этим критерием новые лопатки разработаны с увеличением толщины лопатки на середине пера и уменьшением толщины лопатки на двух краях кромки (верхнем и нижнем) для повышения долговечности радиального рабочего колеса. На рисунке 10 представлены еще три варианта с изменением толщины радиальной лопатки для достижения этой цели. В вариантах № 3 и 4 предполагается увеличение толщины лопатки (1,1Н) на середине пера и уменьшение толщины (0,9Н) на двух краях кромки. В варианте № 5 толщина лопатки увеличивается (1,2Н) на середине пера и уменьшается (0,8Н) на двух краях кромки. Геометрия кромки имеет форму окружности. Направления изменения толщины лопатки помечаются красными стрелками. Толщина радиальной лопатки изменяется на правой стороне лопатки – вариант № 3, на левой стороне лопатки – вариант № 4 и на двух сторонах лопатки – вариант № 5.

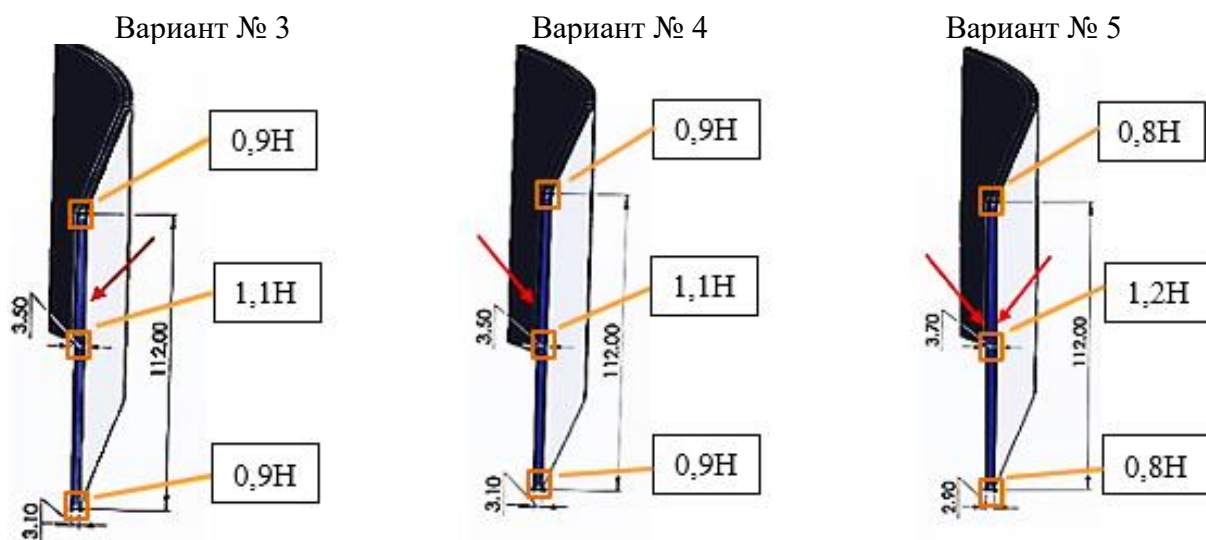
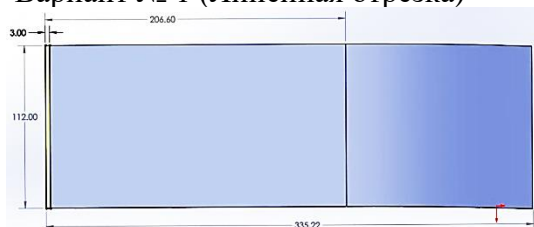


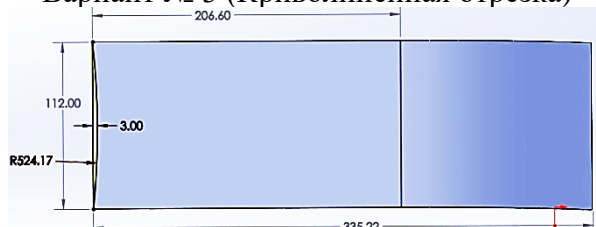
Рис. 10. Предварительные варианты с изменением толщины радиальной лопатки

Далее автором предложены четыре варианта изменения длины всех лопаток (линейное и криволинейное) на рисунке 11 для оценки ресурсных характеристик радиального рабочего колеса. Варианты № 1 и 3 приводят к линейной и криволинейной отрезке длины лопаток. Варианты № 2 и 4 приводят к линейному и криволинейному удлинению длины лопаток. График распределения долговечности блочных моделей с геометрическим изменением всех лопаток приведен на рисунке 12.

Вариант № 1 (Линейная отрезка)



Вариант № 3 (Криволинейная отрезка)



Вариант № 2 (Линейное удлинение)



Вариант № 4 (Криволинейное удлинение)

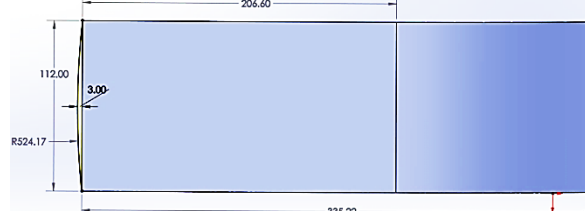


Рис. 11. Предложенные варианты с изменением длины радиальной лопатки

Изменение толщины всех лопаток колеса на рисунке 12 показывает, что с увеличением толщины лопаток (вариант № 2) происходит увеличение долговечности радиального рабочего колеса на +12,89%. При этом увеличение толщины по всей лопатке на середине пера и уменьшении на двух краях кромки (вариант № 4) приводит к увеличению долговечности радиального рабочего колеса на +14,84%. Анализ результатов изменения длины всех лопаток колеса на рисунке 12 показывает, что долговечность рабочего колеса уменьшается до -0,79% при линейной отрезке лопаток (вариант № 1). А в остальных вариантах долговечность радиального рабочего колеса увеличивается. Вариант № 3 обладает наибольшим процентным изменением до +5,86%.

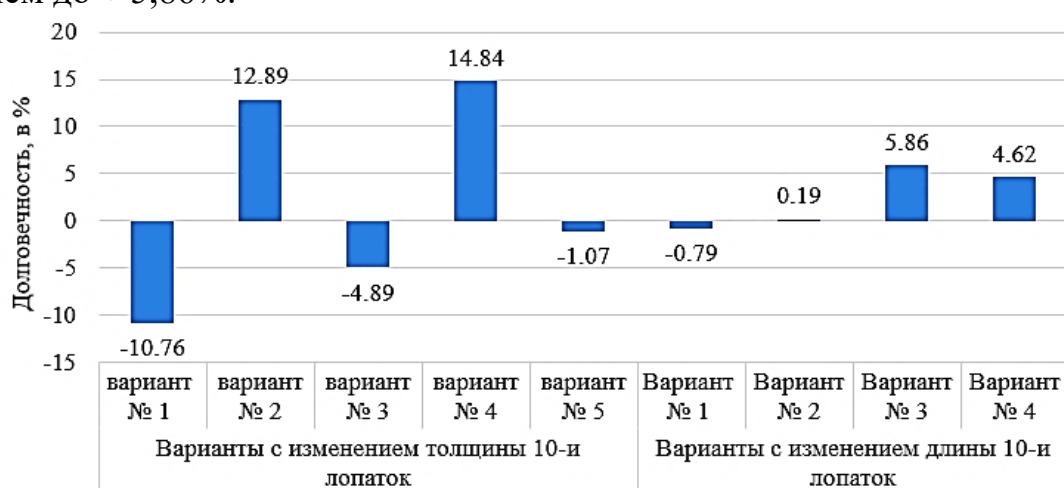


Рис. 12. График распределения долговечности блочных моделей с геометрическим изменением всех лопаток колеса

Таблица – Результаты расчета долговечности блочных моделей колеса с разными лопатками

Блочные модели с расположением лопаток в чередующемся порядке					
Вариант	Преднамеренная расстройка		Номер блочной модели (см. рис. 6)	Долговечность (в циклах)	ΔN , в %
1	Изменение толщины лопатки	С увеличением толщины на 10%	1	$2,0969 \cdot 10^5$	+1,48
2			2	$2,0579 \cdot 10^5$	-1,72
3			3	$1,9473 \cdot 10^5$	-6,70
4			4	$1,9732 \cdot 10^5$	-5,75
5		С уменьшением толщины на 10%	1	$1,9178 \cdot 10^5$	-8,41
6			2	$1,7633 \cdot 10^5$	-15,78
7			3	$1,8138 \cdot 10^5$	-10,51
8			4	$1,7376 \cdot 10^5$	-17,01
9	Материал: сталь 3 - сталь 316L (Российский аналог 03X17H14M3)		1	$2,1259 \cdot 10^5$	+1,53
10			2	$2,0702 \cdot 10^5$	-1,13
11			3	$2,1181 \cdot 10^5$	+1,16
12			4	$2,0923 \cdot 10^5$	-0,07
Блочные модели с учетом циклической симметрии лопаток (см. рис. 7)					
13	Изменение длины лопатки	Линейная отрезка		$2,0701 \cdot 10^5$	-1,14
14		Линейное удлинение		$2,0825 \cdot 10^5$	-0,54
15		Криволинейная отрезка		$2,1355 \cdot 10^5$	+2,01
16		Криволинейное удлинение		$2,1053 \cdot 10^5$	+0,55

На практике разнообразие геометрических форм рабочих лопаток турбомашин всегда имеет место в реальных конструкциях из-за технологии изготовления, дефектов сборки, износа при эксплуатации и других факторов. Для анализа этой проблемы, автором рассмотрены блочные модели с разными лопатками для минимизации явлений дисбаланса, снижения динамической нагрузки и их ресурса с помощью преднамеренной расстройки параметров. Блочные модели включают в себя несколько идентичных лопаток и несколько измененных лопаток. Данные математические модели описаны во второй главе. В таблице приведены итоговые результаты расчета долговечности с помощью блочных моделей радиального рабочего колеса с разными лопатками.

По результатам исследования, отмеченного в таблице, выявлено, что первая блочная модель с увеличением толщины лопатки на 10% имеет повышенное значение циклов до разрушения радиального рабочего колеса (усталостная долговечность). Данная блочная модель эффективна в целях уменьшения максимального коэффициента увеличения амплитуды до 36,55% и увеличения ресурса радиального колеса турбомашин на 1,48% (рис. 13).

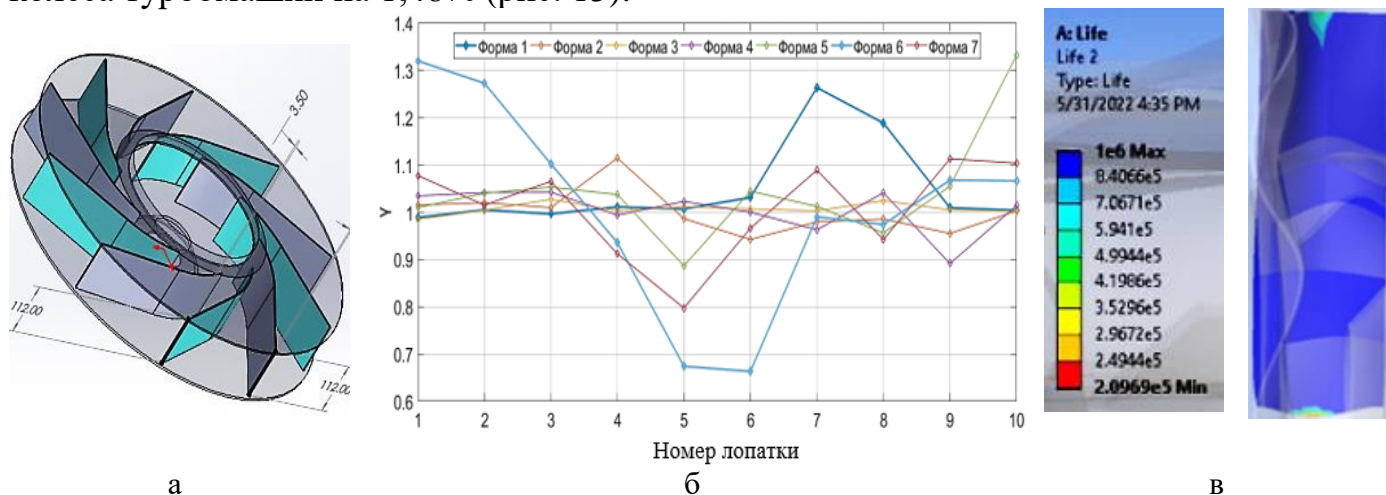


Рис. 13. Эффективная блочная модель с увеличением толщины лопаток (а – блочная модель; б – коэффициент увеличения амплитуды; в – долговечность)

Анализ применения разных материалов в конструкции дисков и лопаток показал, что самой эффективной блочной моделью является блочная модель с учетом диска из стали 3 при чередовании материала лопаток: сталь 3 и сталь 316L. Данная блочная модель эффективна в целях уменьшения максимального коэффициента увеличения амплитуды до 39,91% и увеличения ресурса радиального колеса на 1,53% (рис. 14).

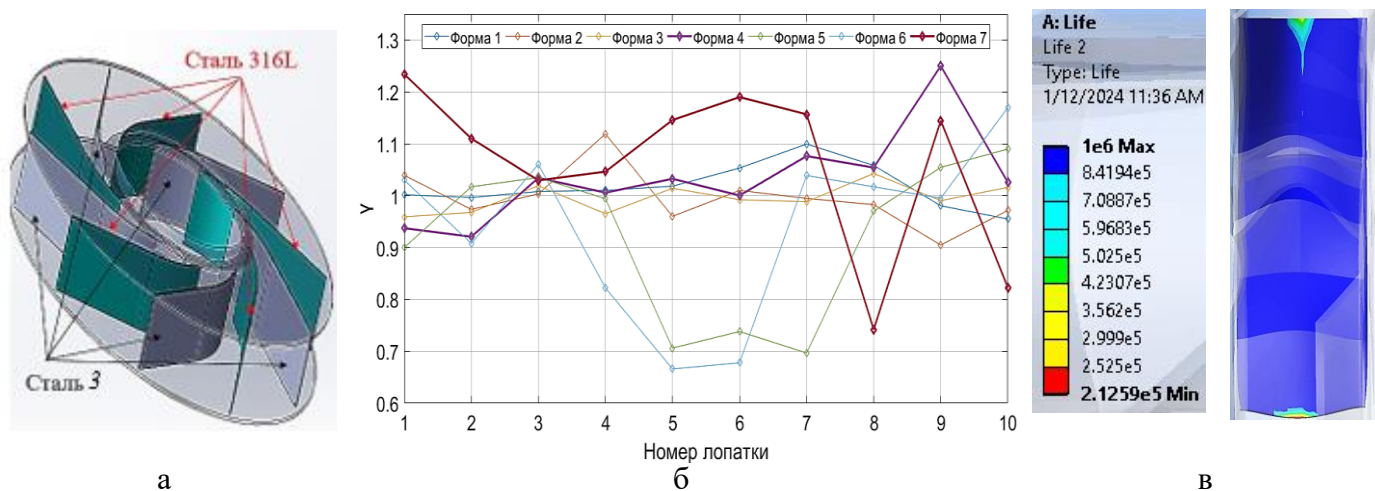


Рис. 14. Эффективная блочная модель с учетом дисков и лопаток из разных материалов (а – блочная модель; б – коэффициент увеличения амплитуды; в – долговечности)

По результатам исследования второго подхода с учетом симметричных лопаток по окружности колеса, самой эффективной блочной моделью является блочная модель с криволинейной отрезкой радиальных лопаток. Данная блочная модель эффективна в целях уменьшения максимального коэффициента увеличения

амплитуды до 44,72% и увеличению ресурса радиального колеса турбомашин на 2,01% (рис. 15).

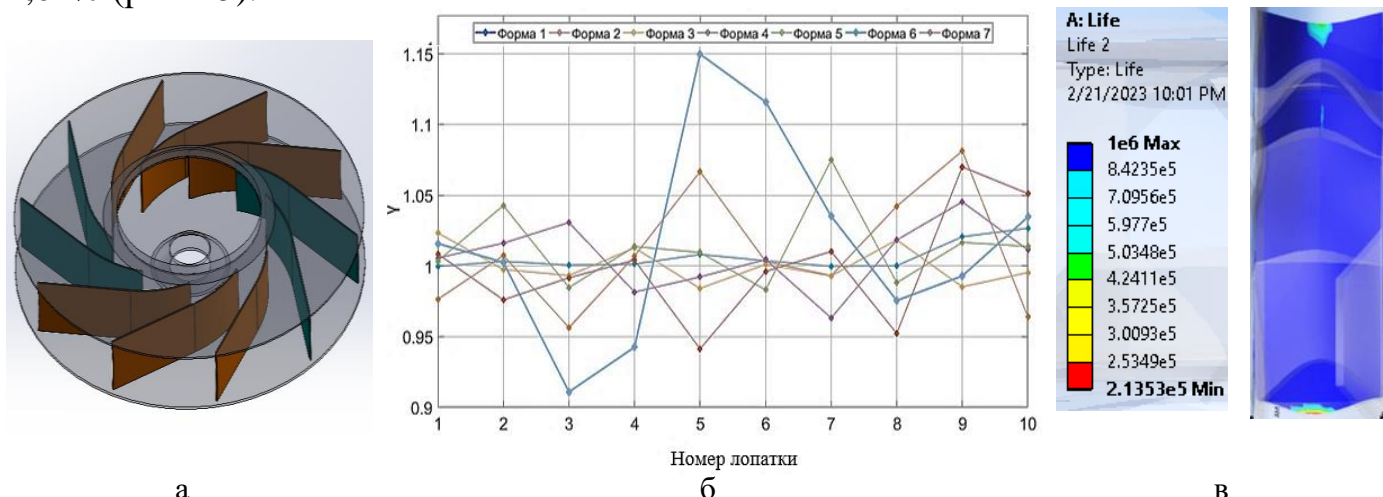


Рис. 15. Эффективная блочная модель с криволинейной отрезкой радиальных лопаток (а – блочная модель; б – коэффициент увеличения амплитуды; в – долговечности)

На следующем этапе проведено исследование влияния количества и глубины нарезных каналов на основном диске колеса для оценки ресурсных характеристик радиального рабочего колеса. Автор предполагает, что каждый нарезной канал имеет ширину и длину, соответственно геометрическим размерам лопаток. Расстояние между ними равномерно распределено на основном диске по окружности колеса. Примеры с четырьмя и восемью лопатками приведены на рисунке 16.

Исследуя массу колеса в программе ANSYS, автором разработана основная закономерность в изменении массы основного диска в зависимости от количества и глубины нарезных каналов в одном секторе колеса:

$$\Delta m \approx 0,08875ka, \quad (13)$$

где Δm – изменение массы основного диска, k – количество нарезных каналов в одном секторе колеса ($k = 1, \dots, 8$), a – глубина нарезных каналов.

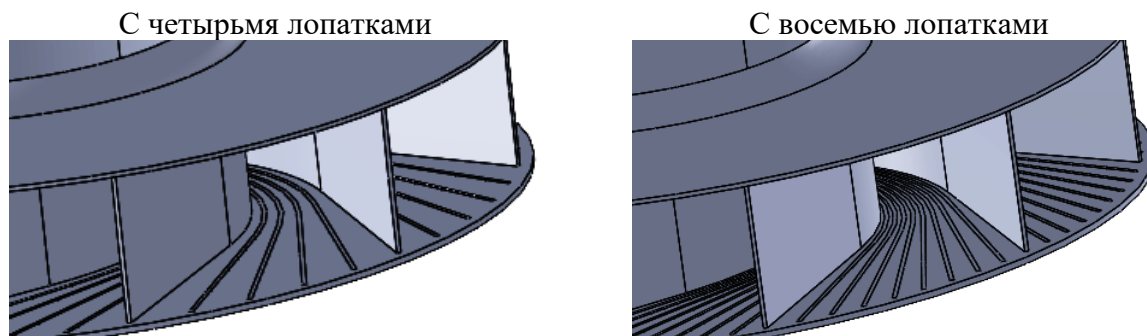


Рис. 16. Вариант исследования количества нарезных каналов в одном секторе радиального колеса

Следует отметить, что радиальное рабочее колесо с учетом нарезных каналов на основном диске способствует увеличению долговечности радиального рабочего колеса. В ходе исследований выяснено, что нарезные каналы на основном диске колеса и изменение геометрических лопаток приводят к небольшому изменению исходной массы колеса. Данное изменение может влиять на работоспособность и ресурс других частей конструкции турбомашин. В связи с этим в данной главе предлагаются новые варианты моделирования массово-сбалансированной конструкции колеса и учета их ресурса.

По результатам исследования, оптимальным вариантом для колеса является комбинирование варианта изменения толщины всех лопаток (рис. 17б) и глубины нарезных каналов на основном диске – 0,28 мм (рис. 17в) для получения массово-сбалансированной конструкции. Данное смоделированное колесо увеличивает скорость потока через сопло, а также способствует увеличению долговечности радиального рабочего колеса на +24,88%.

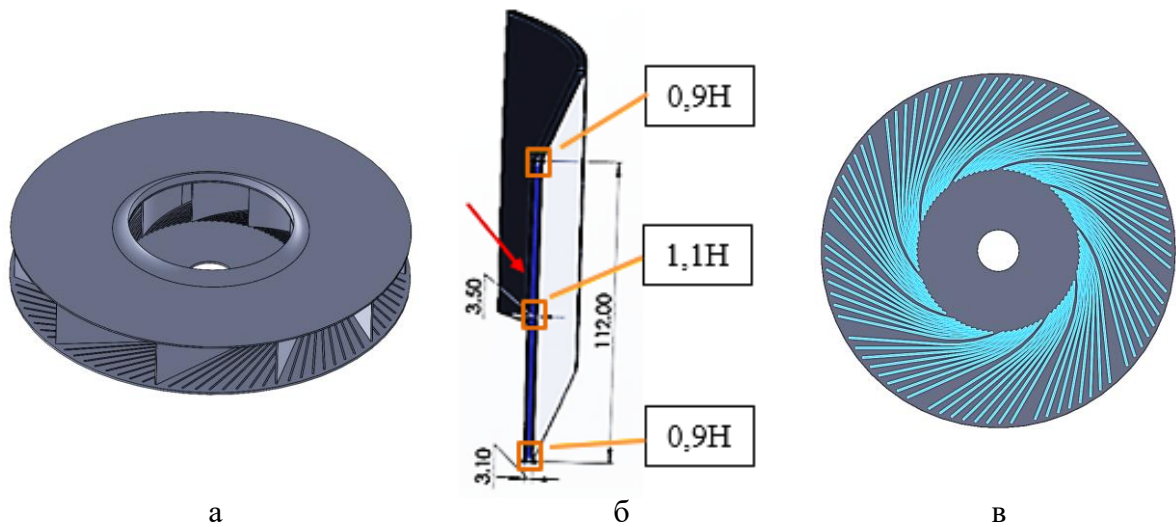


Рис. 17. Моделирование массово-сбалансированной конструкции радиального рабочего колеса (а – общий вид; б – предлагаемая лопатка; в – вид нарезного канала)

На основе вышеприведенных результатов исследования долговечности реального радиального рабочего колеса с учетом преднамеренной расстройки параметров, автором предложены следующие рекомендации для производителей энергетических и транспортных турбомашин по увеличению или продлению ресурсных характеристик при проектировании и доводке новых изделий или их эксплуатации:

1. Блочная модель с криволинейной отрезкой всех лопаток (вариант № 3, рис. 11). Использование данного варианта способствует увеличению долговечности радиального рабочего колеса на +5,86%. Данный вариант может быть полезен при ремонте лопаток, если во время работы происходит повреждение на середине входной кромки лопаток.
2. Блочная модель с увеличением толщины всех лопаток на 10% (1,1H). Использование данного варианта способствует увеличению долговечности радиального рабочего колеса на +12,89%.
3. Блочная модель с увеличением толщины всех лопаток (1,1H) на середине пера и уменьшении толщины (0,9H) на двух краях кромки (вариант № 4, рис. 10). Использование данного варианта способствует увеличению долговечности радиального рабочего колеса на +14,84%.
4. Наилучшим вариантом для колеса является комбинирование варианта изменения толщины всех лопаток и нарезных каналов на основном диске для получения массово-сбалансированной конструкции (см. рис. 17). Данная конструкция колеса увеличивает как скорость потока через сопло, так и долговечность радиального рабочего колеса на +24,88%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита точные и экономичные методы численного анализа собственных колебаний, чувствительности и долговечности лопаток радиальных рабочих колес без и с расстройкой параметров на основе метода конечных элементов. Предложенные методы апробированы и верифицированы на тестовых и реальных конструкциях радиальных рабочих колес. Результаты расчетов собственных частот и статических напряжений модельных и реальных радиальных колес хорошо согласуются с экспериментальными данными и расчетами в различных программах NISA, FEARS, BLADIS+ и ANSYS.

2. Проведено тестирование и верификация созданных математических моделей на примере модельных лопаток с учетом чувствительности собственных колебаний конструкций от вращения и температуры. Выполнены исследования динамических характеристик и ресурса радиального рабочего колеса с трапециевидным спектром нагружения лопаток.

3. Создан специализированный комплекс оригинальных программ, ориентированный на персональные ЭВМ и прошедший широкую апробацию на роторных деталях академических и реальных радиальных рабочих колес.

4. Исследовано влияния расстройки параметров на ресурсные характеристики радиальных рабочих колес и выполнен сравнительный анализ долговечности радиальных рабочих колес с расстройкой различного вида и с разными законами ее распределения. Полученные результаты могут быть использованы для повышения долговечности радиальных рабочих колес турбомашин при их проектировании или доводке, а также в целях продления ресурса в эксплуатации.

5. Рекомендованы рекомендации для конструкторов энергетических и транспортных турбомашин с учетом преднамеренной расстройки параметров на основе блочных моделей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 1.2.2 (технические науки)

1. Хоанг Д.К. Численное исследование прочности радиальных турбомашин на основе применения нержавеющей стали 316L / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *System Analysis and Mathematical Modeling*. – 2024. – Т. 6. – № 1. – С. 89-102. – DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(1).89-102 (0,88 п.л., в т.ч. авторский 0,45 п.л.).
2. Хоанг Д.К. Численный анализ оптимизации ресурсных характеристик радиального колеса турбомашин введением преднамеренной расстройки параметров / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *System Analysis and Mathematical Modeling*. – 2023. – Т. 5. – № 2. – С. 192-204. – DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(2).192-204 (0,81 п.л., в т.ч. авторский 0,40 п.л.).
3. Хоанг Д.К. Математическое моделирование чувствительности собственных колебаний конструкций с учетом вращения и неравномерного нагрева / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2023. – № 4(32). – С. 79-90. – DOI 10.25729/ESI.2023.32.4.007 (0,75 п.л., в т.ч. авторский 0,40 п.л.).
4. Хоанг Д.К. Математическое моделирование и численный анализ влияния толщины радиальных рабочих лопаток на долговечность энергетических турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2023. – № 1(29). – С. 44-53. – DOI 10.38028/ESI.2023.29.1.004 (0,63 п.л., в т.ч. авторский 0,35 п.л.).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по прочим специальностям

5. Хоанг Д.К. Исследование способов повышения ресурсных характеристик радиальных турбомашин с помощью расстройки геометрических и механических параметров / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2024. – № 76. – С. 15-29. – DOI 10.15593/2224-9982/2024.76.02 (0,94 п.л., в т.ч. авторский 0,50 п.л.).
6. Хоанг Д.К. Исследование прочностных характеристик элементов радиальных роторов турбомашин на основе разработанных математических моделей и программного интерфейса / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Вестник НГИЭИ*. – 2024. – № 5(156). – С. 30-45. – DOI 10.24412/2227-9407-2024-5-30-45 (1,00 п.л., в т.ч. авторский 0,50 п.л.).
7. Хоанг Д.К. Математическое моделирование и численная оценка долговечности радиальных рабочих колес турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2022. – № 69. – С. 53-61. – DOI 10.15593/2224-9982/2022.69.06 (0,57 п.л., в т.ч. авторский 0,30 п.л.).
8. Хоанг Д.К. Компьютерное моделирование и численный анализ чувствительности радиальных колес турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Вестник НГИЭИ*. – 2022. – № 7(134). – С. 22-36. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-7-22-36 (0,94 п.л., в т.ч. авторский 0,5 п.л.).
9. Хоанг Д.К. Анализ преднамеренной расстройки параметров при изменении толщины радиальных лопаток турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // *Вестник НГИЭИ*. – 2022. – № 3(130). – С. 7-23. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-3-7-23 (1,06 п.л., в т.ч. авторский 0,55 п.л.).
10. Хоанг Д.К. Численное исследование преднамеренной расстройки параметров при сверлении отверстий в лопатках энергетических турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг, В.В. Нгуен // *Вестник НГИЭИ*. – 2021. – № 12(127). – С. 17-34. – DOI 10.24412/2227-9407-2021-12-17-34 (1,13 п.л., в т.ч. авторский 0,30 п.л.).

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus

11. Хоанг Д.К. Верификация разработанных математических моделей и программного обеспечения на примере радиальных рабочих колес турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // Достижения науки и техники АПК. – 2024. – Т. 38, № 5. – С. 55-61. – DOI 10.53859/02352451_2024_38_5_55 (0,44 п.л., в т.ч. авторский 0,25 п.л.).
12. Hoang D.C. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning / O.V. Repetckii, D.C. Hoang // E3S web of conferences: XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness - INTERAGROMASH 2022”, Rostov-on-Don, 25–27 мая 2022 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2022. – P. 01044. – DOI 10.1051/e3sconf/202236301044 (0,38 п.л., в т.ч. авторский 0,20 п.л.).
13. Hoang D.C. Physical and mathematical modeling and computer analysis of radial impellers for chemical and power engineering, taking into account ecology / O.V. Repetckii, D.C. Hoang // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Virtual, Online, 24–26 ноября 2021 года. – Virtual, Online, 2022. – № 990. – P. 012044. – DOI 10.1088/1755-1315/990/1/012044 (0,57 п.л., в т.ч. авторский 0,30 п.л.).

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618312 Российская Федерация. Программа для расчета чувствительности радиальных рабочих колес от изменения масс (SENS_RAD): № 2022617636; заявл. 26.04.2022; опублик. 05.05.2022 / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665054 Российская Федерация. Программа для расчета ресурсных характеристик радиальных рабочих колес с учетом динамической нагрузки (RES_RAD): № 2023663623; заявл. 29.06.2023; опублик. 11.07.2023 / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».