

**Янюкина Мария Викторовна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ  
ТОЧНОСТИ СБОРКИ РАБОЧИХ КОЛЁС ТУРБИНЫ  
АВИАЦИОННОГО ГТД**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

Научный руководитель:

Болотов Михаил Александрович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Семенов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», профессор кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения»;

Силюянова Марина Владимировна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита состоится 16 мая 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» и на сайте:

[https://www.ssau.ru/storage/pages/6710/file\\_67bf0b53101690.23374700.pdf](https://www.ssau.ru/storage/pages/6710/file_67bf0b53101690.23374700.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов  
Александр Сергеевич

**Актуальность темы исследования.** Надёжность работы изделия зависит от многих факторов, главным из которых является точность изготовления деталей и сборки узлов. Одним из узлов, оказывающим влияние на надёжность и ресурс газотурбинного двигателя (ГТД), является рабочее колесо (РК) турбины. В конструкции РК турбины присутствуют рабочие лопатки с бандажными полками, которые обеспечивают требуемую жёсткость и позволяют повысить КПД за счёт снижения потерь в радиальном зазоре. Отличительной особенностью лопаток турбины при сборке является предусмотренная конструктором возможность качки в замковых пазах диска. Геометрическим параметром, влияющим на ресурс РК, является натяг по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток. Несоответствие этого параметра требованиям, указанным в сборочном чертеже, приводит к выкрашиванию контактных поверхностей лопаток и выходу деталей из строя. Параметр натяга определяет надёжность работы РК турбины. На величину натяга оказывает влияние качка лопаток в пазах диска при сборке РК, а также силы, возникающие при контакте по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток и приводящие к их кручению. Фактические значения натягов и зазоров в рабочем колесе определяются посредством предварительных сборок. По результатам измерений геометрических параметров принимается решение о варианте комплектования и расстановки лопаток в РК. Наилучший вариант комплектования и расстановки можно получить при большом количестве сборок РК, что на практике затруднительно и не эффективно.

Данную проблему можно решить за счёт использования компьютерного расчёта с целью выбора благоприятного варианта сборки РК. Разработка модели, оценивающей геометрические сборочные параметры на основе размерно-точностного анализа, позволит заменить предварительные сборки компьютерным расчётом. Это приведёт к существенному снижению трудоёмкости сборочного процесса и повышению точности геометрических параметров сборки, а значит, увеличению ресурса работы турбины и авиационного ГТД в целом.

В связи с этим тема диссертационной работы – разработка метода обеспечения геометрической точности сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД – является актуальной для современного авиадвигателестроения и соответствует заявленной специальности.

**Степень разработанности темы.** Вопросами размерного анализа геометрических параметров сборки, а также точностью сборки занимались: Балакшин Б.С., Бородачев Н.А., Шевелев А.С., Иващенко И.А., Солонина И.С., Дунаев П.Ф., Демин Ф.И., Иванов В.А., Сурков О.С., Непомилуев В.В., Польский Е.А., Филькин Д.М., Шабалин А.В., Белобородов С.М., Семенов А.Н., Силуянова М.В., Болотов М.А., Печенина Е.Ю. и другие.

Следует отметить, что существующие подходы проведения размерного анализа с целью обеспечения точности геометрических сборочных параметров изделия имеют высокий уровень теоретической разработанности. Большое количество исследований по этой тематике можно найти как среди отечественных исследователей, так и зарубежных. Обобщая работы по рассматриваемой тематике, можно отметить, что исследования велись по следующим направлениям:

- решение задачи обеспечения геометрических параметров сборки с помощью размерных цепей в плоской и пространственной постановках;
- предварительный процесс сборки в системах САД при условии моделирования деталей, имеющих производственную погрешность;

– учёт силового фактора при сборке, опираясь на результаты экспериментальных исследований.

Анализируя выполненные исследования, можно выделить дальнейшие пути развития рассматриваемой тематики, которые предполагается раскрыть в данной диссертации:

– решение размерных цепей, учитывающих их взаимосвязанность;

– учёт силового фактора при сборке, позволяющий наиболее точно определить величину геометрических сборочных параметров по бандажным полкам РК.

**Цель работы.** Снижение трудоёмкости процесса сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД за счёт разработки и использования метода, позволяющего оценивать и достигать заданную точность натягов и зазоров по бандажным полкам лопаток с учётом качки и силового взаимодействия между ними.

#### **Задачи исследования.**

1. Разработать метод обеспечения геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД, учитывающий особенности, связанные с деформацией лопаток и их качкой в пазах диска.

2. Разработать модель оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток, учитывающую влияние их качки в замковых пазах диска на взаимное положение в РК авиационного ГТД.

3. Определить функциональную зависимость, позволяющую уточнять значения натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток РК с учётом их взаимного влияния.

4. Выполнить исследования влияния размеров замкового соединения лопаток на поле рассеивания геометрических сборочных параметров РК турбины.

5. Разработать алгоритм комплектования деталей для выполнения сборки РК турбины авиационного ГТД с учётом её особенностей.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан метод обеспечения геометрической точности сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД, отличающийся способом расчёта зазоров и натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток, который предусматривает разделение и оценку влияющих на геометрические параметры колёс факторов качки и силового взаимодействия между лопатками от закрутки бандажных полок при монтаже с использованием модели и функциональной зависимости, применимых в производстве.

2. Разработана модель оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток, учитывающая влияние их качки в замковых пазах диска на взаимное положение в РК турбины авиационного ГТД.

3. Предложена функциональная зависимость для уточнения значений натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток РК посредством учёта их кручения, вызванного взаимным действием возникающих при сборке сил, при рассмотрении лопаток в виде эквивалентных балок.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработанном методе обеспечения геометрической точности сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД, предложенных модели оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток РК и функциональной зависимости для уточнения значений натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток РК.

**Практическая ценность исследования** заключается в разработанном алгоритме комплектования деталей для выполнения сборки РК турбины авиационного

ГТД, учитывающем её особенности и повышающем точность и эффективность сборочного процесса.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.** Соответствует п. 9 – Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита.

Работа направлена на совершенствование процесса сборки РК турбины авиационного ГТД с применением компьютерного расчёта отдельных этапов сборки. В работе предложены метод, модель и функциональная зависимость, позволяющие имитировать процесс сборки диска РК с лопатками с учётом деформации лопаток и их качки в пазах диска и взаимного влияния друг на друга.

**Методы и средства исследований.** Общий подход к решению поставленных задач базируется на оценке геометрических параметров РК турбины ГТД в ходе сборки. Теоретические исследования осуществлялись с использованием методов математического моделирования, а также линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики. Математическое обеспечение расчётов осуществлялось с использованием математического аппарата линейной и матричной алгебры в среде MATLAB.

**Объект исследований.** Технология сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД, имеющих лопатки с бандажными полками.

**Предмет исследований.** Метод обеспечения геометрических сборочных параметров бандажных полок лопаток рабочего колеса турбины авиационного ГТД.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. Метод обеспечения геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД.

2. Модель оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток РК.

3. Функциональная зависимость для уточнения значений натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток посредством учёта их кручения, вызванного взаимным действием возникающих при сборке сил.

4. Алгоритм комплектования деталей для выполнения сборки РК турбины авиационного ГТД.

**Достоверность результатов** проведенного исследования обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применением известных численных методов, обладающих высокой точностью, при проведении вычислительных экспериментов; хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения работы были представлены на конференциях всероссийского и международного уровня: Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении», посвященной 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Папшева Дмитрия Дмитриевича, г. Самара, Самарский государственный технический университет, 22-25 октября 2015 г.; Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016), г. Самара, СГАУ имени академика С.П. Королёва, 17-19

мая 2016 г.; Международной научно-технической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2016)», г. Томск, 5-7 декабря 2016 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России», г. Рыбинск, 24-27 апреля 2017 г.; Международной молодёжной научной конференции «XIV Королёвские чтения», посвящённой 110-летию со дня рождения академика С.П. Королёва, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли, г. Самара, Самарский университет, 03-05 октября 2017 г.; Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018)», г. Самара, 14-16 апреля 2018 г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара, Самарский университет, 23-25 июня 2021 г.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ООО «Специальное конструкторское бюро турбоагрегатов», а также внедрены в учебный процесс Самарского университета, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 статьи в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК, и 2 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus/Web of Science.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (включая 78 наименований) и приложения. Общий объём составляет 127 страниц, 44 рисунка и 14 таблиц.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, приведена краткая характеристика работы, сформулирована цель и изложена научная новизна исследования, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения об апробации работы.

**В первой главе** описан объект исследования, проведён анализ основных методов сборки, выделены их основные достоинства и недостатки, выполнен анализ факторов, влияющих на эффективность работы турбины.

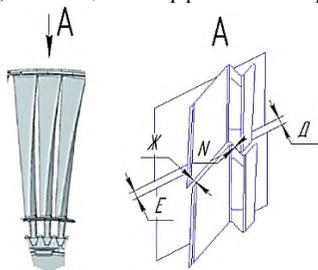


Рисунок 1 – Основные сборочные параметры

Важное значение имеют геометрические параметры турбины, которые определяют качество сборки рабочего колеса. К таким параметрам относятся: зазоры между замковыми полками соседних лопаток (E, D на рисунке 1), зазор между бандажными полками соседних лопаток (Ж на рисунке 1) и натяг по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток (N на рисунке 1).

Лопатки имеют возможность перемещения в пазах диска («качка»). Положение, которое лопатка займет после сборки РК, зависит от размеров бандажных полок самой лопатки и соседних с ней. При этом формируемые между лопатками натяги N так же зависят от положения лопаток в пазах диска. Описание размерных связей в таком случае требует их рассмотрения с учётом взаимного влияния, что значительно усложняет задачу

оценки натягов. Решение размерных связей между отдельными лопатками без учёта их взаимосвязи приводит к недостоверным результатам.

Выполнен обзор публикаций по проблеме размерного анализа при сборке узлов: работы А.С. Шевелева, В.А. Иванова, Ф.И. Демина, В.В. Непомилуева, М.Е. Ильиной, О.С. Суркова, Е.А. Польского, Д.М. Филькина, А.В. Шабалина, С.А. Чевычелова, Г.А. Расторгуева, А.Н. Семенова, М.А. Болотова и других. Анализ существующих методов расчёта размерных связей показал, что вопрос учёта влияния силового фактора на величину замыкающего звена размерной цепи требует дальнейшей проработки.

Выполнен обзор публикаций, посвящённых вопросам моделирования сборочных размерных связей в авиационной промышленности (работы В.В. Непомилуева, М.Е. Ильиной, А.К. Иванюка, В.Ф. Безъязычного, В.А. Спиридонова, В.В. Сибирского, С.К. Чоткаевой, С.М. Белобородова, К. Lupinetti, F. Giannini, M. Monti, Z. Zhu, L. Qiao, N. Anwerb, Q. Xiaodong, S. Xiulib и других). В большинстве работ исследования ведутся в направлении предварительной проверки собираемости изделия посредством моделирования деталей с учётом производственных погрешностей в САД системах. Анализ публикаций показал необходимость разработки моделей, которые должны учитывать взаимовлияние лопаток друг на друга и их деформацию в ходе сборки.

На основании проведенного обзора публикаций сформированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке метода обеспечения геометрической точности сборки РК турбины, учитывающего её особенности, связанные с деформацией лопаток и их качкой в пазах диска. Основным геометрическим сборочным параметром, определяющим параметры Д, Е и Ж (рисунок 1), является натяг  $N$  по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток, который и рассматривается в моделях и зависимостях.

В первом разделе главы описан метод обеспечения геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД. На рисунке 2 представлена блок-схема метода.



Рисунок 2 – Блок-схема метода обеспечения геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД

Он включает в себя два этапа. На первом этапе выполняется расчёт геометрических сборочных параметров РК как абсолютно жёсткого тела, результатом являются величины этих параметров, а именно натяги  $N$  между соседними лопатками.

При этом используются следующие модели: размерные цепи для расчёта натяга и зазоров между двумя соседними лопатками; параметрическая модель оценки качки лопатки в замке диска; модель оценки натягов между бандажными полками лопаток, учитывающая влияние их качки в замковых пазах диска на взаимное положение в РК. На втором этапе выполняется уточнённый расчёт геометрических сборочных параметров РК, натягов  $N$ , в частности, с учётом жёсткости и взаимовлияния лопаток. На этом этапе применяются функциональная зависимость, позволяющая определить значения натягов с учётом возникающих между лопатками сил, и конечно-элементная модель для получения регрессионной зависимости угла разворота лопатки от силового фактора. Конечным результатом являются уточнённые значения геометрических сборочных параметров, в нашем случае – углов разворота лопаток, характеризующих натяг  $N$ .

Во втором разделе главы описывается модель оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток, учитывающая влияние их качки в замковых пазах диска на взаимное положение в РК турбины авиационного ГТД. Оценка натяга, образуемого между стыковыми поверхностями бандажных полок соседних лопаток, выполняется с использованием размерной цепи, рассмотренной в третьем разделе второй главы. Однако лопатки в РК имеют возможность качки в пазах, что оказывает влияние на натяги по их бандажным полкам. Качка лопатки в пазу диска учитывается в размерной цепи при помощи параметров смещения и угла наклона, которые являются неизвестными. Значения этих параметров определяются в ходе решения задачи минимизации натягов по стыковым поверхностям бандажных полок. Критерием нахождения собранного состояния РК является минимизация максимального значения величины натяга:  $K(\bar{N}_{max}) \rightarrow \min$ . Целевая функция для вычисления критерия в модели включает расчёт натягов между стыковыми поверхностями бандажных полок соседних лопаток с использованием размерной цепи. Функция имеет вид:

$$\bar{N}_{i,(i+1)} = \bar{F}(\bar{P}_i^b, \bar{P}_i^d, \bar{Y}_i^{b-d}, \bar{Z}_i^{b-d}),$$

$$i = \bar{1}, \bar{m}, i = 1, \text{ при } i + 1 > m, \quad (1)$$

где  $\bar{N}_{i,(i+1)}$  – натяг между стыковыми поверхностями бандажных полок соседних лопаток;  $i = 1 \dots m$  – номер лопатки;  $m$  – количество лопаток в РК;  $\bar{P}_i^b$  – геометрические параметры (размеры) лопаток;  $\bar{P}_i^d$  – геометрические параметры диска (замковой части);  $\bar{Y}_i^{b-d}, \bar{Z}_i^{b-d}$  – параметры, характеризующие положение (качку) лопатки в пазу диска по осям  $Y$  и  $Z$ , соответственно.

Критерий нахождения собранного состояния РК в модели представлен выражением:

$$\text{СКО}(\bar{N}_{i,(i+1)}) \rightarrow \min, \quad |\bar{N}_{i,(i+1)}^{max}| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\text{СКО}(\bar{N}_{i,(i+1)})$  – среднеквадратичное отклонение натяга,  $\bar{N}_{i,(i+1)}^{max}$  – максимальное значение натяга.

Подбор параметров  $\bar{Y}_i^{b-d}, \bar{Z}_i^{b-d}$ , характеризующих положения (качку) лопаток в пазах диска по осям  $Y$  и  $Z$ , соответственно, выполняется с учётом ограничений:

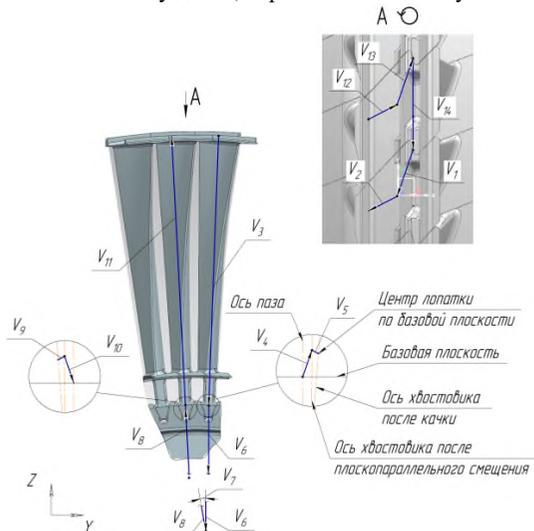
$$\bar{Y}_i^{b-d} \min < \bar{Y}_i^{b-d} < \bar{Y}_i^{b-d} \max,$$

$$\bar{Z}_i^{b-d} \min < \bar{Z}_i^{b-d} < \bar{Z}_i^{b-d} \max, \quad (3)$$

где  $\bar{Y}_i^{b-d} \min, \bar{Z}_i^{b-d} \min, \bar{Y}_i^{b-d} \max, \bar{Z}_i^{b-d} \max$  – минимальные и максимальные значения параметров, характеризующих положение (качку) лопатки в пазу диска (т.е. самое левое и правое положения) по осям  $Y$  и  $Z$ , соответственно.

Результатом решения модели оценки натягов по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток являются найденные параметры, характеризующие положения лопаток в пазах диска, и натяги по бандажным полкам лопаток.

В третьем разделе второй главы рассматриваются размерные цепи для геометрических сборочных параметров – натяга по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток N и зазоров по замковым и бандажным полкам лопаток Д, Е и Ж, соответственно. Векторные размерные цепи построены для двух соседних лопаток. Составляющими звеньями размерной цепи являются геометрические параметры лопаток и диска, а замыкающим звеном – рассматриваемый сборочный параметр. Количество звеньев в сформированных цепях составляет 13 – для цепей натягов, и 15 – для цепей зазоров. В каждой размерной цепи присутствует звено, отвечающее за перемещение лопатки в пазу диска, отражающее её качку. В цепи для натяга это векторы  $\vec{V}_4$  и  $\vec{V}_5$ ,



отвечающие за плоско-параллельное движение лопатки в пазу диска и её качку, соответственно. На рисунке 3 показана схема размерной цепи для натяга. Общее уравнение цепи натяга представлено выражением (4):

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 + \vec{V}_4 + \vec{V}_5 + \vec{V}_6 + \vec{V}_7 + \vec{V}_8 + \vec{V}_9 + \vec{V}_{10} + \vec{V}_{11} + \vec{V}_{12} + \vec{V}_{13} + \vec{V}_{14} + \vec{V}_{15} = 0. \quad (4)$$

В четвёртом разделе главы представлена параметрическая модель хвостовика лопатки и фрагмента диска – паза.

Модель позволяет визуализировать возможные положения хвостовика лопатки в пазу диска и определить границы допустимых значений плоскопараллельного и углового перемещений лопатки в пазу диска.

Рисунок 3 – Схема размерной цепи для натяга по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток

В пятом разделе главы описана функциональная зависимость, позволяющая уточнять значения натягов по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток РК с учётом их взаимного влияния. Уточнение натягов посредством функциональной зависимости выполняется в два этапа с использованием двух выражений. Первое из них (8) позволяет определить величины углов разворота бандажных полок лопаток при сборке РК по значениям сил, возникающих между стыковыми поверхностями полок. Второе выражение (7) позволяет оценить величину этих сил на основе индивидуальных размеров лопаток.

При контакте соседних лопаток по стыковым поверхностям бандажных полок формируется натяг и возникают силы. Контактные площадки стыковых поверхностей лопаток между собой параллельны, поэтому в модели используем нормальную составляющую силы. На рисунке 4 схематично отображён контакт двух лопаток и сил, действующих между ними.

При воздействии силы  $F$ , возникающей из-за натяга, лопатка будет стремиться развернуться против часовой стрелки. Натяг и угол разворота соседних лопаток можно представить в виде:

$$N = 2\pi R_1 \alpha_1 + 2\pi R_2 \alpha_2, \quad (5)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиус вращения при развороте бандажных полок лопаток 1 и 2, соответственно;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – угол разворота бандажных полок лопаток 1 и 2, соответственно;  $2\pi R_1 \alpha_1, 2\pi R_2 \alpha_2$  – длины дуг, по которым будут перемещаться точки контакта стыковых поверхностей бандажей 1 и 2 лопаток, соответственно.

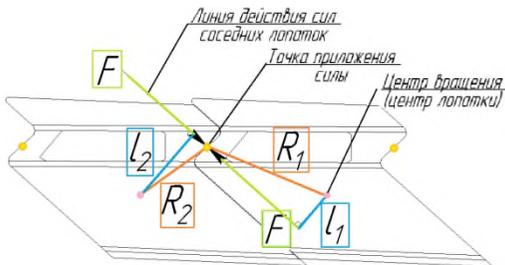


Рисунок 4 – Схематичное отображение контакта двух соседних лопаток

Представляя угол  $\alpha$ , как произведение момента на линейный коэффициент  $k$ , и заменяя момент, как произведение силы  $F$  на плечо  $l$ , получаем формулу расчёта величины силы, возникающей при контакте двух лопаток:

$$F = \frac{N}{2\pi k(R_1 l_1 - R_2 l_2)} \quad (6)$$

где  $F$  – возникающая сила;  $l$  – плечо приложения силы  $F$ ;  $k = \frac{1}{E \cdot I_x}$  – податливость;  $E$  – модуль упругости;  $I_x$  – момент инерции при кручении.

Аналогичным образом представлены случаи для трёх и четырёх лопаток, находящихся в контакте, и выведена закономерность формирования матрицы расчёта возникающих сил. Величина силового фактора определяется через обратную матрицу (7):

$$\begin{pmatrix} F^1 \\ F^2 \\ F^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\pi k R_1^1 l_1^1 - 2\pi k R_2^1 l_2^1 & 2\pi k R_2^1 l_2^2 & 0 \\ -2\pi k R_2^2 l_2^1 & 2\pi k R_2^2 l_2^2 - 2\pi k R_3^2 l_3^2 & 2\pi k R_3^2 l_3^3 \\ 0 & -2\pi k R_3^3 l_3^2 & 2\pi k R_3^3 l_3^3 - 2\pi k R_4^3 l_4^3 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} N^1 \\ N^2 \\ N^3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Верхние индексы составляющих элементов матрицы обозначают номер пары соседних лопаток, а нижние индексы – номер лопатки.

В шестом разделе второй главы рассматривается получение выражения, позволяющего определить величины углов разворота бандажных полок лопаток при сборке РК по значениям сил, возникающих по стыковым поверхностям полок. Выражение получено с использованием конечно-элементной модели (КЭМ) лопатки для оценки её перемещений с учётом действия силы, возникающей при сборке рабочего колеса. Реализованная в программном комплексе ANSYS расчётная КЭМ включает объёмную модель лопатки с ограничениями перемещения, приложенными к её хвостовику. В модели к стыковым поверхностям бандажной полки приложена сила, позволяющая имитировать усилие, действующее на лопатку в собранном РК. Проведена серия расчётов с разными величинами сил, которые могут возникать при сборке. Построен график зависимости угла разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки от силы, возникающей по стыковым поверхностям контакта соседних лопаток (рисунок 5).

Данный график позволяет определить угол разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки на основе рассчитанных значений сил. По этим данным было определено выражение (8), которое позволяет определить уточнённую величину натяга, оцениваемую в ходе сборки РК по углу разворота бандажной полки лопатки:

$$\alpha_i = 98,14 \times F^j + 12,73 \times 10^{-3} \quad (8)$$

где  $\alpha_i$  - угол разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки (нижний индекс  $i$  обозначает номер лопатки),  $F^j$  - возникающая между соседними лопатками сила (верхний индекс  $j$  обозначает номер пары соседних лопаток)

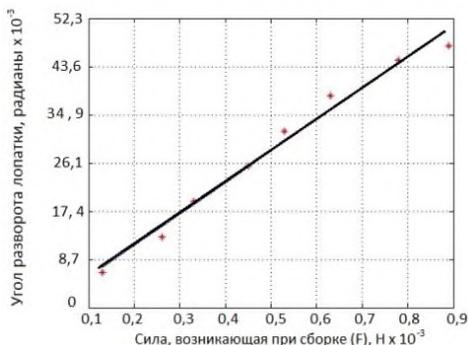


Рисунок 5 – График зависимости угла разворота торцевой части бандажной полки относительно замковой полки от силы, возникающей при сборке

В седьмом разделе второй главы приведён алгоритм расчёта геометрических сборочных параметров РК турбины с использованием предложенных моделей и зависимостей (рисунок 6).



Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма расчёта геометрических сборочных параметров венцов РК турбины

**В третьей главе** приведены теоретические исследования влияния размеров замкового соединения лопаток на поле рассеивания геометрических сборочных параметров РК турбины.

В первом разделе главы представлены исследования зависимостей натягов и зазоров по полкам лопаток от их положения в пазах диска (качки), которые заключаются в имитационно-статистическом моделировании полей рассеивания сборочных параметров с использованием размерных цепей, разработанных во второй главе. Результаты исследований показали, что из рассмотренных геометрических сборочных параметров натяг в большей степени зависит от положения лопатки в пазу диска. Наибольшее влияние на изменение натяга оказывает перемещение лопатки в пазу диска вдоль оси Y в радиальном направлении. Поэтому в дальнейших расчётах будет

учитываться это перемещение. Разность значений натяга достигает 25 % при условии изготовления лопатки согласно техническим требованиям чертежа.

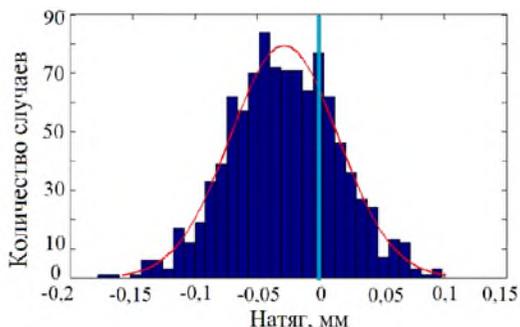


Рисунок 7 – Распределение величины натяга

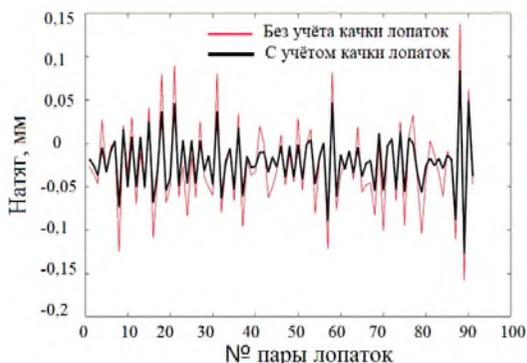


Рисунок 8 – График распределения натяга между соседними лопатками

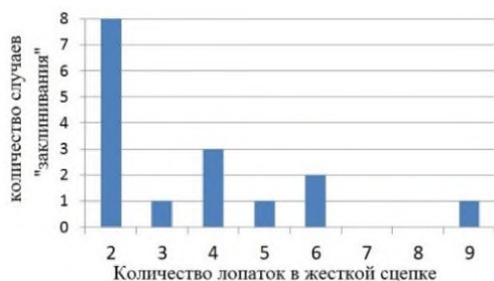


Рисунок 9 – График распределения, показывающий соотношение лопаток, находящихся в жёсткой сцепке

По результатам исследования около четверти возможных значений показали положительные значения величины натяга, что свидетельствует об образовании зазора между бандажными полками по стыковым поверхностям лопаток (рисунок 7).

Во втором разделе третьей главы представлен результат расчёта натягов на основе данных, полученных в ходе измерения лопаток. Теоретические исследования выполнялись с использованием разработанных во второй главе моделей. Необходимость учёта качки лопаток в пазах диска РК при определении величины геометрического сборочного параметра – натяга, оценивалась по результатам двух расчётов. Первый из них включал звено, отражающее качку лопатки, а во втором – это звено отсутствовало. На рисунке 8 представлен график, показывающий величины натягов между парами лопаток при наличии качки и её отсутствии.

По результирующим данным расчёта (величины натягов между лопатками) можно проследить, что некоторые лопатки группируются, находясь в жёстком зацеплении, и образуют так называемый клин. Количество лопаток в таком состоянии колеблется в среднем от 3 до 7, максимальное количество лопаток в зацеплении – 9. На рисунке 9 представлено графическое отображение распределения натяга, показывающее соотношение между лопатками, находящимися в жёсткой сцепке. График отражает характер неравномерности распределения натяга по РК, которая может быть улучшена за счёт перекомплектования и механической доработки стыковых поверхностей бандажных полок лопаток.

В третьем разделе текущей главы приведены экспериментальные исследования, заключающиеся в измерении геометрических сборочных параметров рабочего колеса турбины. Измерения выполнялись с использованием специализированного приспособления, настраиваемого посредством эталонной лопатки. В ходе эксперимента проводились измерения лопаток, осуществлялась сборка РК турбины, затем выполнялись измерения натяга и зазора по бандажным полкам лопаток. Полученные результаты проанализированы, подтверждено нормальное распределение величины натяга по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток, что соответствует распределению, полученному с использованием моделей и зависимостей, разработанных во второй главе.

В таблице 1 представлены результаты сравнения теоретического и экспериментального исследований, включающие параметры законов распределения величины натяга по стыковым поверхностям бандажных полок соседних лопаток.

Таблица 1 – Сравнение результатов теоретического и экспериментального исследований

Параметр	Исследование		Погрешность	
	Теоретическое	Экспериментальное	Абсолютная	Относительная, %
Среднеквадратическое отклонение геометрического сборочного параметра	0,016	0,018	0,002	11,89
Математическое ожидание геометрического сборочного параметра	0,014	0,016	0,002	12,95

Данные обоих исследований сравнивались по единому параметру – углу разворота бандажного венца лопатки, исчисляемому в радианах. Величины среднеквадратических отклонений и математических ожиданий при теоретическом и экспериментальном исследованиях отличаются не более, чем на 13 %, что говорит об удовлетворительной сходимости разработанных моделей.

**В четвёртой главе** представлена практическая реализация результатов диссертационных исследований.

В первом разделе главы приведён алгоритм комплектования деталей для выполнения сборки РК турбины авиационного ГТД с учётом её особенностей, блок-схема которого представлена на рисунке 10. Алгоритм сформирован с учётом существующей в производстве технологии сборки РК. В алгоритме предусмотрена замена предварительных сборок РК компьютерным расчётом натягов и зазоров, в основе которого лежат разработанные в главе 2 модели и зависимости. Расчёт натягов выполняется на основе результатов измерения лопаток в замковой части и между контактными поверхностями бандажной полки, а также паза диска.

Во втором разделе обоснована целесообразность применения компьютерного расчёта при сборке рабочего колеса турбины по разработанному методу с точки зрения временных затрат.

По существующей в производстве технологии предусмотрено выполнение четырёх предварительных сборок РК, длительностью 2-3 часа, позволяющих определить величины натягов. Компьютерный расчёт позволит сократить количество предварительных сборок до двух, что снизит суммарную трудоёмкость сборки РК на 50 %.

В третьем разделе выполнен имитационный расчёт, включающий: формирование комплектов лопаток, размеры которых задавались случайным образом в пределах поля допуска, сборку РК с использованием алгоритма, разработанного в первом разделе главы 4, и оценку колёс на собираемость. В ходе расчёта определено, что для успешного комплектования рабочего колеса (содержащего 91 лопатку) по величине качки лопаток в диске, на этапе сборки необходимо иметь набор, равный 153 лопаткам.

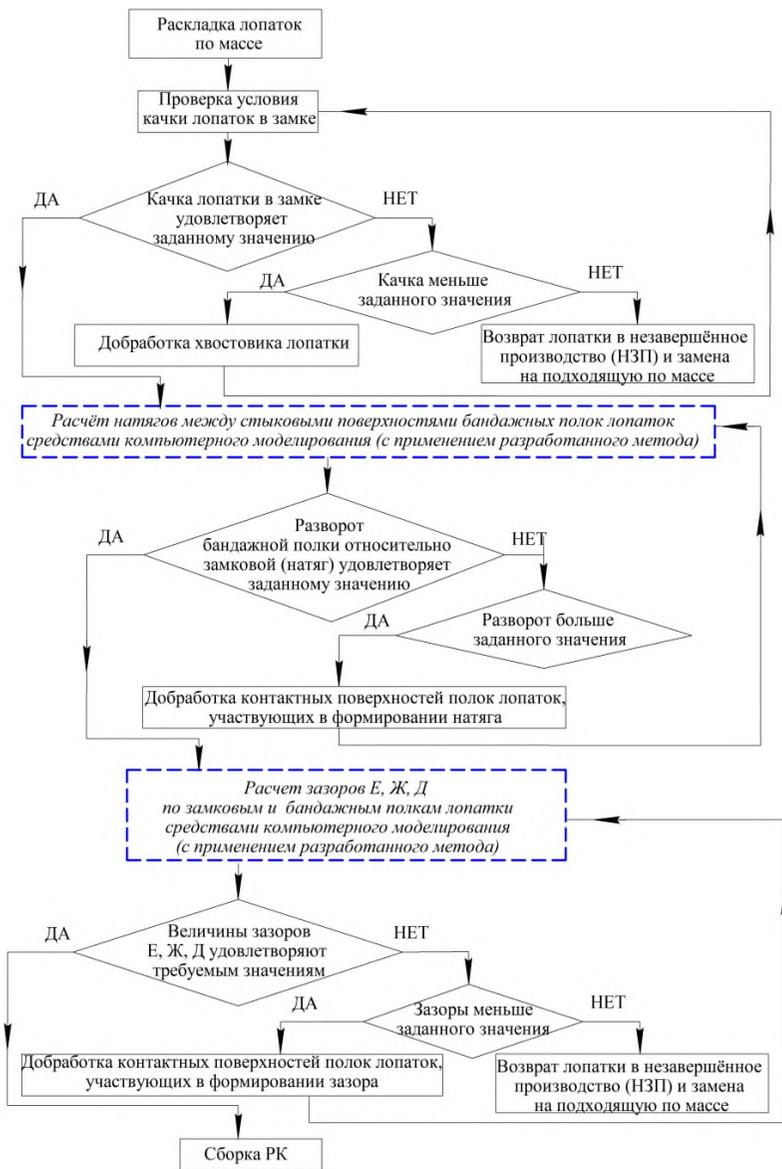


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма комплектования лопаток для сборки РК турбины

### Выводы и основные результаты работы.

В работе представлено решение значимой научно-технической задачи, заключающейся в снижении трудоёмкости процесса сборки рабочих колёс турбины авиационного ГТД за счёт разработки и использования метода, модели и

функциональной зависимости, позволяющих оценивать и достигать заданную точность натягов и зазоров по бандажным полкам лопаток и предназначенных для комплектования деталей в условиях производства.

На основании выполненных исследований получены следующие результаты.

1. Разработан метод обеспечения геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД, учитывающий её особенности, связанные с деформацией лопаток, и их качкой в пазах диска. Применение метода позволило обеспечить достижение требований к точности сборки РК по геометрическим параметрам за счёт применения комплекса расчётных моделей и алгоритма комплектования деталей для выполнения сборки РК, и при этом снизить трудоёмкость процесса за счёт уменьшения количества предварительных сборок с 5 до 2.

2. Разработана модель и функциональная зависимость для расчёта геометрического сборочного параметра РК турбины – натяга по стыковым поверхностям бандажных полок лопаток, позволяющие производить поэтапный расчёт натягов, учитывающий взаимовлияние и возникающие между лопатками силы. Для реализации модели и зависимости были разработаны: размерные цепи для расчёта сборочных параметров рабочего колеса турбины; параметрическая модель замковой части лопатки и паза диска, учитывающая плоскопараллельное перемещение лопатки в пазу диска и качку; конечно-элементная расчётная модель лопатки в процессе сборки РК, учитывающая влияние силовых факторов со стороны соседних лопаток. Верификация моделей показала различие между теоретическими и экспериментальными значениями натягов по бандажным полкам лопаток РК не более чем на 13 %, что говорит об удовлетворительной сходимости разработанных моделей.

3. Проведены исследования влияния качки лопаток в пазах диска на величины геометрических параметров РК турбины и их зависимостей от точности изготовления входящих деталей. Качка лопаток, а именно их перемещение в радиальном направлении (вдоль оси Y), оказывает заметное влияние на величину натяга. В рассматриваемом РК относительная разница значений натяга для двух соседних лопаток без учёта качки и с её учётом может достигать 25%. После сборки рабочего колеса соседние лопатки могут находиться в жёсткой сцепке, образуя группы количеством до 9 единиц, что говорит о возможности возникновения зазоров. Выявленный характер неравномерности натяга по РК может быть скорректирован за счёт перекомпоновки и механической доработки стыковых поверхностей бандажных полок лопаток.

4. Разработан алгоритм комплектования лопаток для сборки рабочего колеса турбины. Использование алгоритма позволит технологу выбирать благоприятный вариант комплектования рабочего колеса турбины. Компьютерный расчёт сборочного процесса РК позволил определить, что для обеспечения 100 % собираемости одного рабочего колеса, содержащего 91 лопатки при использовании предложенного метода, необходимый объём незавершенного производства, составляет 153 лопатки, в том время как при традиционном подходе расчётный задел должен составлять 400 лопаток.

Таким образом, поставленная цель достигнута и может считаться выполненной в полном объёме. Разработанный метод, включающий модель и функциональную зависимость, позволяет решать практические задачи для обеспечения заданной геометрической точности сборки РК турбины авиационного ГТД, при этом сокращая временные затраты, что повышает эффективность процесса сборки. Представленные модель и функциональная зависимость могут быть использованы при проведении прочностных расчётов изделия на различных режимах его работы с учётом формы контакта бандажных полок лопаток РК турбины.

Перспектива дальнейшего развития темы исследования состоит в разработке и апробации инженерной методики комплектования РК турбины авиационного ГТД.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. **Янюкина, М.В.** Модель оценки натягов по бандажным полкам лопаток при сборке рабочих колёс турбин / М.В. Янюкина, М.А. Болотов, Е.В. Кудашев // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10. – №2. – С. 7-17.
2. Болотов, М.А. Теоретико-вероятностная оценка объёмов незавершенного производства при сборке рабочего колеса турбины / М.А. Болотов, Т.В. Ефремова, **М.В. Янюкина** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 21. – №1. – С. 86-90.
3. **Янюкина, М.В.** Математическое моделирование погрешности сборочных параметров в авиадвигателестроении / М.В. Янюкина, И.Г. Бедрин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. – 2017. – Т.41. – №2. – С. 348-351.
4. Печенин, В.А. Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, **М.В. Янюкина** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т.15 – №2 – С.162-170.

### Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

1. **Yanyukina, M.V.** Interrelated Dimensional Chains in Predicting Accuracy of Turbine Wheel Assembly Parameters / M.V Yanyukina, M.A. Bolotov, N.V. Ruzanov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – С.022106.
2. **Yanyukina, M.V.** Modeling of turbine wheel assemblies taking into account the deformation of parts / M.V Yanyukina, M.A. Bolotov // MATEC Web of Conferences. 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018. – 2018. – С.02058.

### Публикации в других изданиях

1. Болотов, М.А. Исследование силового фактора при сборке рабочих колёс турбин ГТД / М.А. Болотов, Е.В. Кудашов, **М.В. Янюкина** // сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – 2021. – С. 241-242.
2. **Янюкина, М.В.** Прогнозирование точности сборочных параметров рабочих колёс турбин / М.В. Янюкина, М.А. Болотов // труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». – 2018. – С. 1167-1170.
3. **Янюкина, М.В.** Особенности технологических размерных расчётов при выполнении сборочных работ / М.В. Янюкина, М.А. Болотов // Сб. трудов Международной молодёжной научной конференции «XIV Королёвские чтения». –2017. – С.452-453.
4. **Янюкина, М.В.** Моделирование взаимосвязанных размерных цепей в авиационной технике / М.В. Янюкина, М.А. Болотов // Сб. материалов Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016). – 2016. – С. 749-751.
5. **Янюкина, М.В.** Теоретическая постановка задачи взаимосвязанных размерных цепей // Сб. научных трудов V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» – 2016. – С. 465-466.
6. **Янюкина, М.В.** Взаимосвязанные размерные цепи при производстве газотурбинных двигателей // материалы Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении». – 2015. – С. 250-251.