

На правах рукописи

Кудашов Евгений Викторович

**МЕТОД СНИЖЕНИЯ ДИСБАЛАНСА РАБОЧИХ КОЛЁС ГТД
С УЧЁТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПРОФИЛЕЙ
ПЕРА ЛОПАТОК И НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЗОВОЙ СИЛЫ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

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: **Нихамкин Михаил Шмерович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Авиационные двигатели»;

Рыженков Валентин Михайлович,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа.

Защита состоится 5 июня 2026 г. В 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного 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://ssau.ru/storage/pages/6902/file_6996add39b79d4.81325002.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

А.С. Виноградов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Лопаточные машины являются неотъемлемым элементом конструкции многих ответственных изделий, таких как: газотурбинные двигатели и энергетические установки, ветрогенераторы, гидротурбины, высоконапорные вентиляторы, турбокомпрессоры, двигатели внутреннего сгорания, ракетные двигатели и др. Такие изделия характеризуются высокими требованиями к их эксплуатационным и геометрическим параметрам. При производстве и испытаниях газотурбинных двигателей (ГТД) нередко возникают случаи возникновения повышенной вибрации, требующие полной или частичной разборки изделия и его узлов. Повышенная вибрация может быть вызвана множеством причин, одной из которых является возникновение дисбалансов рабочих колёс (РК) из-за влияния отклонений расположения профилей пера лопаток на неравномерность газодинамических сил в компрессорной решётке.

Отклонения расположения профилей пера лопаток приводят к возникновению радиальной составляющей газодинамической силы, вызванной нерасчётным течением воздушного потока сквозь компрессорную решётку РК. Воздействие газодинамической силы приводит к выносу центра масс профилей лопаток в результате их деформаций. Любые отклонения расположения профилей пера лопаток, даже лежащие в пределах допуска, приводят к неравномерности радиальных составляющих газодинамических сил. В итоге формируется неуравновешенная возбуждающая сила, являющаяся причиной возникновения дисбаланса РК.

Снизить дисбаланс РК, вызванный отклонениями расположения профилей пера лопаток, возможно за счёт ужесточения и обеспечения в производстве геометрических допусков, а также измерения и компенсации дисбаланса с использованием разгонно-балансировочных стендов. Реализация названных предложений приведёт к существенным производственным затратам. Перспективным способом снижения дисбаланса РК является его оценка и определение условий компенсации по результатам измерений геометрии пера лопаток при сборке. Реализация данного способа требует разработки специализированной методики и модели.

Таким образом, тема диссертации «Метод снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы» является актуальной.

Степень проработанности темы исследования. Проблемами оценки и компенсации дисбалансов РК занимались учёные: Филимоныхин Г.Б., Караблин М.А., Леонтьев М.К., Олийниченко Л.С., Корнеев Н.В., Полякова Е.В., Брусиловский И.В., Александров В.Л., Дьяченко А.Ю., Новиков Д.К., Kim J.-H., Ovgor V., Cha K.-H., Lee S., Kim K.-Y. и другие.

Представленными авторами сформирован существенный теоретический и практический задел в данной области исследований. Обзор опубликованных работ позволяет заключить перспективность методик и моделей, позволяющих оценивать дисбаланс РК при учёте: 1) отклонения расположения профилей пера лопаток; 2) деформаций пера лопаток под действием центробежных и газовых сил, приводящих к различному изменению углов установки профилей и шагов; 3) натягов по контактными поверхностям антивибрационных полок.

Цель работы. Снижение дисбаланса РК ГТД посредством совместного учёта неравномерности газовых сил в компрессорной решётке и геометрических отклонений профилей пера лопаток.

Задачи исследования.

1. Разработка метода снижения дисбаланса РК ГТД, вызванного неравномерностью газодинамических сил в компрессорной решётке из-за отклонений расположения профилей пера лопаток.

2. Разработка методики создания параметрической модели оценки дисбаланса РК, учитывающей действующие в узле нагрузки и отклонения расположения профилей пера лопаток.

3. Формирование зависимостей, действующих на лопатку РК при работе изделия газовых сил от отклонения расположения профилей пера лопаток, нагрузок и сборочных параметров для дальнейшего определения дисбаланса.

4. Проведение теоретико-экспериментальных исследований влияния отклонений расположения профилей пера лопаток РК на величину его дисбаланса.

Научная новизна.

1. Разработан метод снижения дисбаланса РК ГТД, отличающийся модифицированной последовательностью балансировки изделий, учётом неравномерности газодинамических сил в компрессорной решётке и геометрических отклонений профилей пера лопаток.

2. Предложена методика создания параметрической модели для оценки дисбаланса РК, отличающаяся совместным учётом натяга по антивибрационным полкам, величин отклонений расположения профилей пера лопаток и действующих нагрузок, включая центробежные силы, температуру и давление газового потока.

3. Впервые сформированы регрессионные зависимости действующих на лопатку РК при работе изделия газовых сил от отклонений расположения профилей пера лопаток, нагрузок и сборочных параметров для дальнейшего определения дисбаланса.

4. Впервые получены зависимости дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, от режима работы изделия, натяга по антивибрационным полкам, величин отклонений расположения профилей пера лопаток и действующих нагрузок, включая центробежные силы, температуру и давление газового потока.

Теоретическая значимость работы заключается в подходе, предусматривающем использование цифрового двойника ротора при балансировке изделия для определения условий компенсации неуравновешенностей узлов. Цифровой двойник ротора учитывает неидентичность геометрии лопаток и действующие на них нагрузки. Идеи нового подхода заложены в методе снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы. Предложенный метод позволяет углубить понимание особенностей возникновения неуравновешенностей узлов в ходе работы ротора ГТД и расширить теорию балансировки изделий.

Практическая значимость результатов работы заключается в реализации разработанных моделей и разработанного программного приложения для проведения балансировки РК ГТД с целью снижения дисбаланса, вызванного неравномерностью газодинамических сил в компрессорной решётке из-за отклонений расположения профилей пера лопаток.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. п. 9 – Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита.

Методы и средства исследований. Решение поставленных задач выполнялось посредством математического и параметрического моделирования РК. При выполнении теоретических исследований использовался метод конечных элементов, метод регрессионного анализа с применением параметрической модели, теории вероятностей, имитационного моделирования размерных цепей, метода Монте-Карло. Реализация разработанных моделей и алгоритмов выполнялась в системах MATLAB, NX и ANSYS. Выполнение экспериментальных исследований проводилось с использованием разработанного программного приложения, координатно-измерительной машины DEA Global, оптического сканера RangeVision PRO, балансировочной установки на основе при-

бора БалКом-4, высоковакуумной вакуумной камеры ВВ-1 и специализированной оснастки.

Объект исследований. Технологический процесс балансировки РК первой ступени КНД ГТД.

Предмет исследований. Параметры компенсации дисбаланса РК первой ступени КНД, вызванного неуравновешенной возбуждающей силой по причине неточности изготовления лопаток.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод снижения дисбаланса РК ГТД, учитывающий влияние отклонений расположения профиля пера лопаток на неравномерность газодинамических сил в компрессорной решётке.

2. Методика создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД, учитывающая отклонения расположения профилей пера лопаток в параметрическом виде, действующие при работе нагрузки и позволяющая оценить возникающую неуравновешенную силу.

3. Зависимость действующих на лопатку РК при работе изделия газовых сил для дальнейшего определения дисбаланса, отличающаяся совместным учётом отклонений расположения профилей пера лопаток и действующих нагрузок.

4. Зависимости дисбаланса РК ГТД от отклонений расположения профилей пера лопаток и нагрузок, действующих при работе изделия.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применением известных и проверенных численных методов, обладающих высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов; использованием в процессе исследований поверенного метрологического оборудования и сертифицированного программного обеспечения; высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, в том числе: на Международных мультидисциплинарных конференциях по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2019 и FarEastCon-2020; на VI и VII Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, с 30 сентября по 3 октября 2019 г. и 31 августа 2021 г.); на XXIII и XXVI Международных научно-практических конференциях, посвящённых памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, 11-15 ноября 2019 г. 09-12 ноября 2022 г.); на IX международной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство» (Казань, 31 октября 2019 г.); на Международных научно-технических конференциях: «Информационные технологии и нанотехнологии» ИТНТ-2019, ИТНТ-2020 и ИТНТ-2021 (Самара, Самарский университет, 21-24 мая 2019 г., 26-29 мая 2020 г. и 20-24 сентября 2021 г.); на Международных конференциях: «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» (MIST: Aerospace-III-2020 и Aerospace-IV-2021) (Красноярск, Красноярский Дом Науки и Техники, 20-21 ноября 2020 г. и 10-11 декабря 2021 г.); на X Международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин (DVM-2020)» (Самара, 18 сентября 2020 г.); на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 23-25 июня 2021 г.); на VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении («ISMCA' 2022»)» (Таганрог, 15 апреля 2022 г.). Получены документы: свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ «Программный модуль для формирования действительных поверхностей деталей» (№2020662039 от 07 июля 2020 г.), «Программное обеспечение для повышения качества изделий посредством создания и использования их цифровых двойников» (№2020618796 от 4 августа 2020 г.), «Программный модуль для расчёта аэродинамического дисбаланса рабочего колеса при

разных режимах его работы» (№2021664076 от 30 августа 2021 г.), «Программный модуль для цифрового прогнозирования вибрационных параметров роторов» (№2019661901 от 3 сентября 2019 г.).

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на предприятии ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт внедрения от 27.10.2025 г.) в виде метода снижения дисбаланса РК ГТД, отличающийся модифицированной последовательностью балансировки изделий, учётом неравномерности газодинамических сил в компрессорной решётке и геометрических отклонений профилей пера лопаток.

Публикации. Автором по теме исследования опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК России, 5 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Web of Science.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (включающего 135 наименований) и семи приложений. Общий объём диссертации составляет 155 страниц, 45 рисунков и 18 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведена краткая характеристика работы, сформулированы цель, задачи и изложена научная новизна исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе описан объект исследования, выполнен анализ проблем технологии сборки и балансировки РК первой ступени ротора КНД. Выполнен анализ основных причин возникновения повышенной вибрации изделия, к ним относятся: отличие условий работы и балансировки изделия, нарушение центрирования деталей ротора между собой, изменение геометрии ротора под действием нагрузок, дисбаланс, возникающий из-за неуравновешенной возбуждающей силы по причине неточности изготовления лопаток и прочие факторы. Состояние ротора КНД при балансировке на станке при низкой частоте вращения и при работе изделия отличаются. Это приводит к статической, моментной и динамической неуравновешенностям.

Выполнен обзор методов и оборудования для балансировки РК. Балансировка при высокой частоте вращения выполняется двумя основными методами: 1) балансировка по модам вибрации; 2) балансировка по динамическим коэффициентам влияния. Использование названных методов требует серии тестовых запусков ротора. Повышенная вибрация двигателя может быть вызвана не только недостаточной точностью балансировки ротора, но и неуравновешенной возбуждающей силой по причине неточности изготовления лопаток. Одной из причин возникновения неуравновешенной возбуждающей силы при работе ступени вентилятора является изменение распределения течения газового потока относительно заложенного на этапе проектирования состояния. Дисбаланс РК возможно уравновесить методом корректировки масс для одного режима работы. Оценить и снизить дисбаланс, возникающий из-за неуравновешенной возбуждающей силы, возможно за счёт использования стендов, имитирующих условия работы узла или изделия. Операция по снижению рассматриваемой в работе неуравновешенности отдельных узлов двигателя не предусмотрена в связи с высокой стоимостью и трудоёмкостью работ. Поэтому актуальной задачей является разработка методики оценки и снижения дисбаланса РК при учёте производственных погрешностей их изготовления и сборки, а также деформаций деталей, вызванных эксплуатационными факторами.

На величину дисбаланса оказывает влияние неравномерность натягов по антивибрационным полкам лопаток. Выполнен обзор публикаций, посвящённых вопросам разработки моделей расчёта сборочных параметров изделий (работы Непомилуева В.В., Ильиной М.Е., Кравченко И.Ф., Кондратюка Э.В., Титова В.А., Филимоныхина Г.Б., Пейчева Г.И., Качана А.Я., Демина Ф.И., Шевелева А.С. и другие). В названных моделях

не учитывается совместное влияние отклонений расположения профилей пера лопаток сопрягаемых поверхностей деталей и деформаций, вызванных силовыми факторами.

Проведён обзор методов оценки дисбалансов ротора, которые можно разделить на два типа: 1) анализ вибрации, при котором состояния ротора идентифицируются по характерным параметрам сигналов вибрации; 2) искусственного интеллекта, в котором модели машинного обучения обучаются для выявления дисбаланса ротора. Методы, использующие искусственный интеллект, основаны на анализе данных. Вибрации ротора, вызванные различным дисбалансом, могут быть устранены пассивно автоматическим динамическим балансиром, недостатками которого являются усложнение конструкции ротора и увеличение его массы.

На основании проведённого обзора публикаций сформированы задачи исследования.

Во второй главе приведён метод снижения дисбаланса РК ГТД и методика создания параметрической модели оценки дисбаланса РК, а также сформированы зависимости действующих на лопатку РК при работе изделия газовых сил. В первом разделе главы представлен метод снижения дисбаланса РК ГТД, вызванного возникновением неуравновешенной возбуждающей силы при работе узла из-за отклонения расположения профилей пера лопаток. Блок-схема метода приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Блок-схема метода снижения дисбаланса РК ГТД

Метод предусматривает тесное взаимодействие с этапами сборки и балансировки РК и состоит из двух этапов. На первом этапе выполняется подготовка исходных данных, оказывающих влияние на исследуемый дисбаланс РК: 1) анализ и подготовка результатов измерения отклонений расположения профилей пера лопаток, лежащих в пределах допуска, таких как: угол разворота Δ_{oz} вокруг оси OZ, величин смещений Δ_x и Δ_y сечений пера лопатки вдоль осей OX и OY соответственно; 2) расчёт величины натягов по антивибрационным полкам лопаток, с использованием результатов измерений; 3) создание номинальной 3D-модели геометрии лопатки; 4) подготовка параметров рабочего состояния РК. В ходе второго этапа проводится оценка дисбаланса и расчёт параметров его компенсации с учётом деформации пера лопаток, возникающих в процессе сборки и эксплуатации РК. Рассчитанные параметры передаются в цех для проведения балансировки изделия.

Дисбаланс D_a РК можно представить в виде функции:

$$D_a = f(G_2, W), \tag{1}$$

где G_2 – геометрические отклонения деталей; W – параметры работы изделия.

Геометрические отклонения лопаток определяются функцией:

$$G_2 = f(G_{изм}, G_{деф}), \tag{2}$$

где $G_{изм}$ – изменение геометрии лопаток при работе изделия; $G_{деф}$ – измеренные геометрические отклонения деталей.

Геометрические отклонения деталей представлены множеством параметров:

$$G_{изм} = \{l, \overline{\Delta}_X, \overline{\Delta}_Y, \overline{\Delta}_{OZ}\}, \quad (3)$$

где l – расстояние между сопрягаемыми поверхностями антивибрационных полок;

$\overline{\Delta}_{OZ}^{\circ}$ – вектор угла разворота вокруг оси OZ сечений пера;

$\overline{\Delta}_X^{\circ}$ и $\overline{\Delta}_Y^{\circ}$ – вектор величины смещений сечений пера вдоль осей OX и OY соответственно.

Изменение геометрии лопаток при работе изделия определяется функцией:

$$\{\overline{\Delta}_X^{\circ}, \overline{\Delta}_Y^{\circ}, \overline{\Delta}_{OZ}^{\circ}\} = G_{деф}(T_l, P_l, \overline{F}_y, h), \quad (4)$$

где $\overline{\Delta}_{OZ}^{\circ}$ – вектор угла разворота вокруг оси OZ сечений пера, возникающий в результате деформации лопатки;

$\overline{\Delta}_X^{\circ}$ и $\overline{\Delta}_Y^{\circ}$ – вектор величины смещений сечений пера вдоль осей OX и OY соответственно, возникающий в результате деформации лопатки;

$T_l = T_l(W)$; где T_l – распределение температуры по перу лопатки;

$P_l = P_l(W)$; где P_l – распределение давления по перу лопатки;

$\overline{F}_y = \overline{F}_y(W)$; где \overline{F}_y – вектор центробежной силы;

$h = h(G_{изм}, W)$; h – натяг по антивибрационным полкам лопатки.

Параметры работы изделия представлены множеством:

$$W = \{n, G, P, T, C\}, \quad (5)$$

где n – частота вращения ротора; G – расход воздуха через единичный сектор РК; P – статическое давление на входе в РК; T – статическая температура на входе в РК; C – параметры рабочей среды.

Во втором разделе главы приведено описание методики создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД. На рисунке 2 приведена блок-схема методики.

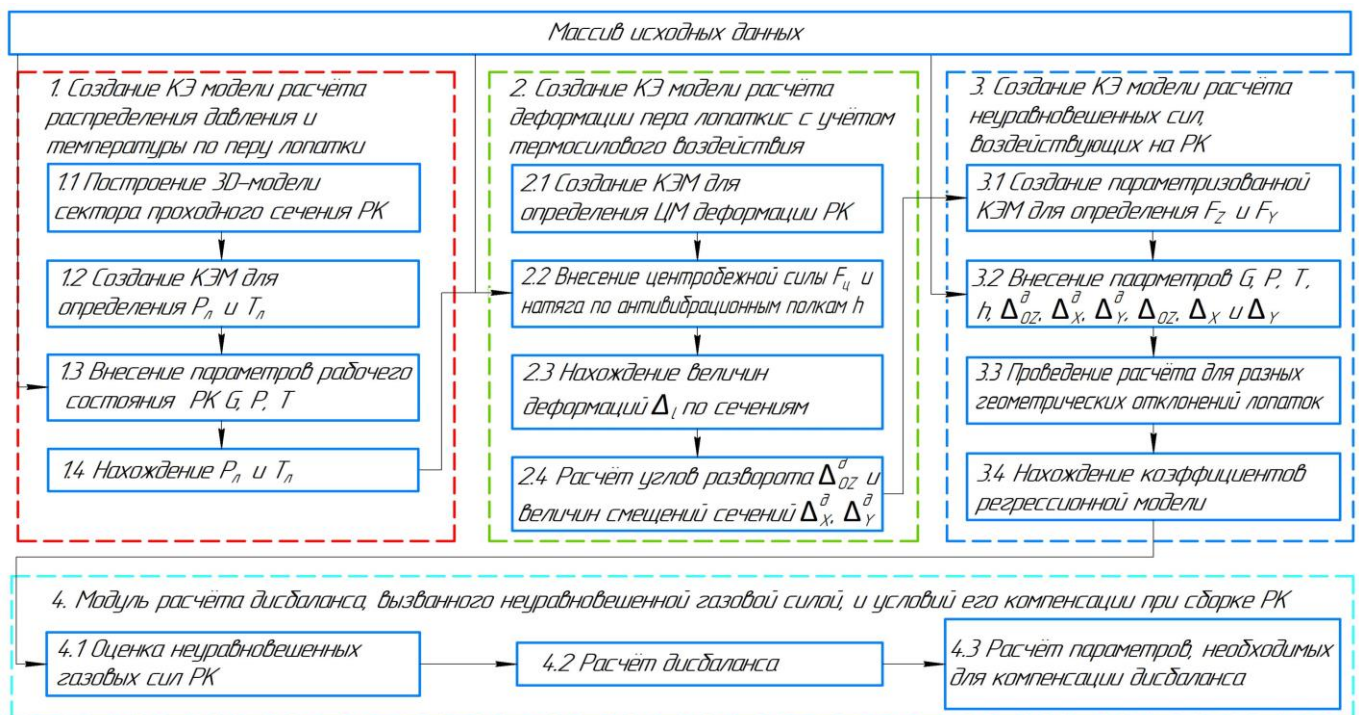


Рисунок 2 – Блок-схема методики создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД

Первый этап методики включает создание конечно-элементной (КЭ) модели для расчёта распределения давления и температуры по перу лопатки с учётом рабочих параметров изделия. Расчёт должен выполняться с использованием КЭ модели сектора проходного сечения РК.

В ходе второго этапа предусматривается создание КЭ модели расчёта деформаций пера лопатки с учётом распределения давления P_l и температуры T_l по перу лопатки, центробежной силы F_y и натяга по антивибрационным полкам лопатки h . Этот этап включает создание параметрической модели для определения индивидуального выноса центра масс лопаток. Производится расчёт угла разворота Δ_{OZ}° вокруг оси OZ , величин смещений Δ_X° и Δ_Y° сечений пера вдоль осей OX и OY соответственно, возникающих в результате деформации лопатки.

На третьем этапе методики предусматривается создание КЭ модели расчёта неуравновешенных сил, действующих на РК. В расчётах используется модифицированная твердотельная 3D-модель лопатки, в которой сечения пера параметрически заданы. Неуравновешенные силы определяются, исходя из заданной величины смещений и разворота задающего сечения лопатки для n -го рассматриваемого варианта. Расчёт Δ_{OZ}° , Δ_X° и Δ_Y° лопатки выполняется на основе деформаций, полученных при статическом расчёте.

На основе рассчитанных вариантов, полученных с использованием созданной параметрической модели, определяется вид и находятся коэффициенты регрессионных зависимостей:

$$\begin{cases} F_Z = f_Z(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_{OZ}, h) \\ F_Y = f_Y(\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_{OZ}, h), \end{cases} \quad (6)$$

где F_Z и F_Y – проекции неуравновешенной газовой силы на оси Oz и Oy , соответственно.

Газодинамические расчёты процесса течения воздуха выполняются с использованием системы уравнений Навье-Стокса. Эскиз сектора РК с нанесёнными контрольными точками приведён на рисунке 3.

Четвёртый этап методики включает создание модуля обработки данных, который выполняет расчёт величины и условий компенсации дисбаланса D_a , возникающего из-за неуравновешенной газовой силы при работе РК по причине отклонения расположения профилей пера лопаток.

На первом шаге проекции вектора сил F_Z и F_Y каждой из лопаток поворачиваются на угол φ , соответствующий её положению в РК и проводится их суммирование для определения радиальной составляющей вектора газодинамической силы F_{Li} . Неуравновешенная радиальная составляющая газодинамической силы F_{Li} возникает из-за неидентичности выноса центра масс каждой лопатки ЦМ2 вследствие погрешности изготовления. Конструктором рассчитывается номинальное значение центра масс ЦМ1 для всех лопаток РК. В параметрической модели индивидуальные отклонения расположения профилей пера лопаток учитываются на третьем этапе. При расчёте определяются деформации каждой лопатки в РК и вынос центра масс. На рисунке 4 показана схема по нахождению неуравновешенной силы в РК.

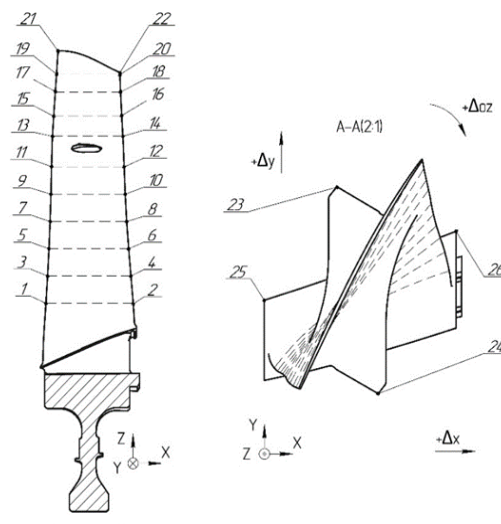


Рисунок 3 – Эскиз сектора РК

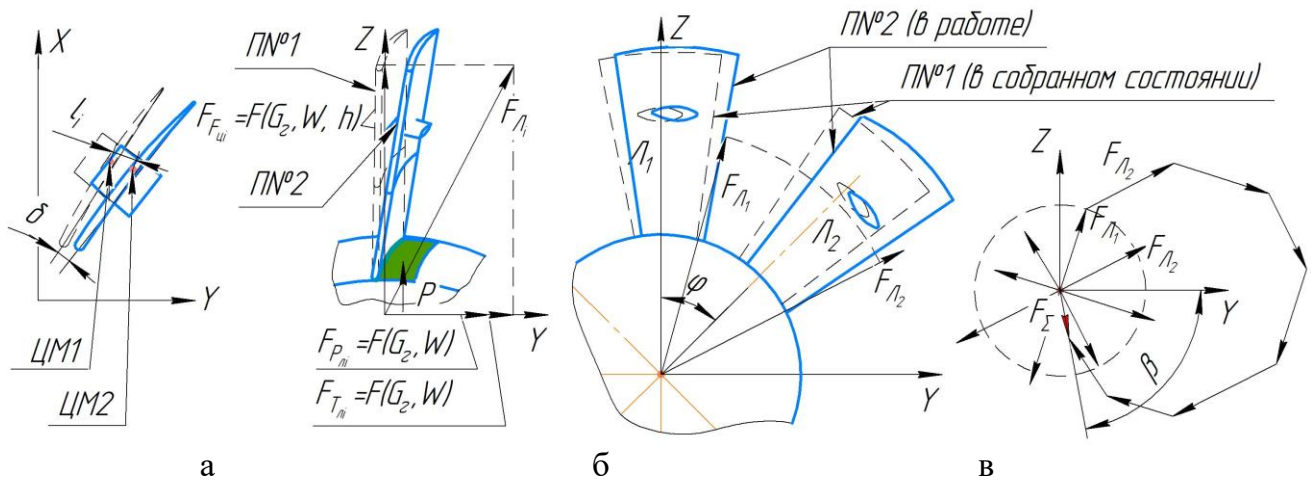


Рисунок 4 – Схема по нахождению неуравновешенной силы в РК:

а) расчётная схема; б) система координат РК; в) диаграмма формирования неуравновешенной силы

Неуравновешенная сила в РК F_{Σ} определяется векторным суммированием радиальных сил (рисунок 4в), действующих на лопатки с учётом системы координат РК (рисунок 4б).

В ходе второго шага рассчитывается дисбаланс D_a РК по формуле:

$$D_a = \bar{F}_{\Sigma} / \omega^2, \quad (7)$$

где ω^2 – угловая скорость вращения РК; \bar{F}_{Σ} – суммарный вектор неуравновешенной силы РК.

Третий шаг включает расчёт массы и углового положения корректирующего груза для устранения дисбаланса, вызванного неуравновешенной силой при работе РК ГТД. Масса корректирующего груза m определяется по формуле:

$$m = D_a / r, \quad (8)$$

где r – радиус расположения корректирующего груза.

Угол χ образованный между вектором \bar{F}_{Σ} и вектором \bar{a}_0 , задающим нулевой положение РК, находится по формуле:

$$\chi = \arccos \left(\frac{\bar{a}_0 \cdot (\bar{F}_{\Sigma})}{|\bar{a}_0| \cdot |\bar{F}_{\Sigma}|} \right), \quad (9)$$

Угол расположения корректирующего груза β находится по выражению:

$$\begin{cases} k = a_0 z \cdot F_{\Sigma y} - a_0 y \cdot F_{\Sigma z} \\ \beta = -\chi + 180 \text{ если } k < 0 \\ \beta = \chi + 180 \text{ если } k > 0 \\ \beta = 0 \text{ если } k = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где $a_0 y$, $a_0 z$ – координаты вектора \bar{a}_0 ; $F_{\Sigma y}$, $F_{\Sigma z}$, – координаты вектора \bar{F}_{Σ} ; k – расстояние, определяющее положение вектора \bar{F}_{Σ} относительно \bar{a}_0 .

Разработанная методика создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД имеет следующие допущения: форма профилей пера лопаток номинальная; механические свойства лопаток не различаются; шероховатость пера лопаток одинаковая; коэффициент трения скольжения по контактным поверхностям антивибрационных полок одинаковый; динамическая прочность лопатки не учитывается.

В третьем разделе главы выполнено теоретическое исследование влияния режима работы изделия, натяга по антивибрационным полкам, действующих при работе изделия нагрузок и величин отклонений расположения профилей пера лопаток на исследуемый дисбаланс РК при его работе. Проведён анализ и выявлены наиболее вероятные отклонения расположения профилей пера лопаток РК первой ступени, которые для контролируемого сечения '11-12' со-

ставили: $\Delta_{Oz} = -9'44''$, $\Delta_x = 0,378$ мм и $\Delta_y = 0,509$ мм. Результаты исследований приведены на рисунках 5 и 6.

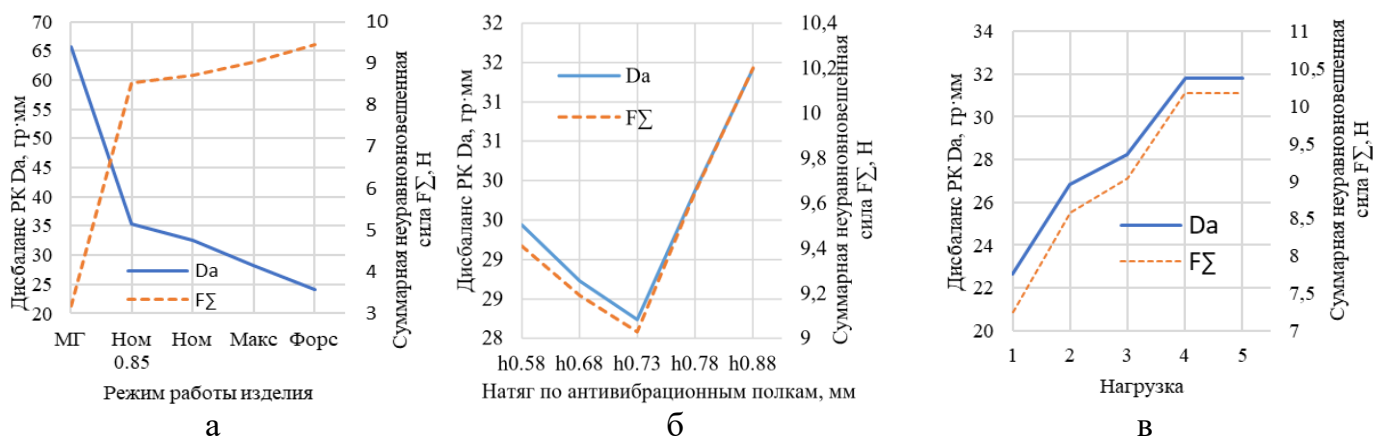


Рисунок 5 – Зависимости дисбаланса РК D_a и суммарной неуравновешенной силы F_Σ от:

а) режима работы изделия; б) натяга по антивибрационным полкам; в) действующих на лопатку нагрузок: 1 – натяга по антивибрационным полкам $h=0,75$ мм и центробежной силы $F_{ц}=436615$ Н; 2 – натяга по антивибрационным полкам $h=0,75$ мм и температуры по перу лопатки $T_l = 32,5$ °С; 3 – натяга по антивибрационным полкам $h=0,75$ мм, температуры по перу лопатки $T_l = 32,5$ °С, давления по перу лопатки $P_l = 12444$ Н/м² и центробежной силы $F_{ц}=436615$ Н; 4 – натяга по антивибрационным полкам $h=0,75$ мм; 5 – натяга по антивибрационным полкам $h=0,75$ мм и давления по перу лопатки $P_l = 12444$ Н/м²

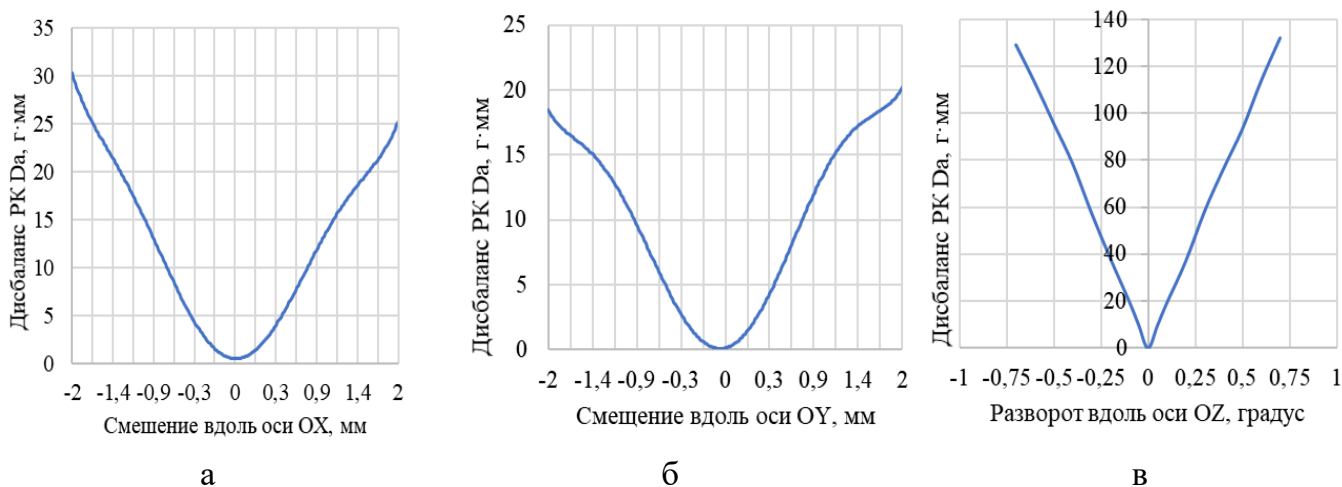


Рисунок 6 – Зависимость дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой D_a от: а) смещения сечения вдоль оси Oх; б) смещения сечения вдоль оси Oу; в) разворота сечения вокруг оси Oz

Возрастание частоты вращения ротора приводит к увеличению суммарной неуравновешенной силы РК, но при этом снижается его исследуемый дисбаланс. Минимальная величина дисбаланса РК возникает при натяге по антивибрационным полкам h , равном 0,73 мм, соответствующем средней границе поля допуска.

Можно отметить, что наиболее значимым фактором при оценке исследуемого дисбаланса является натяг по антивибрационным полкам, наименьшее влияние вносит силовое воздействие газового потока на перо лопатки.

Можно заключить, что наиболее значимым отклонением расположения профилей пера лопаток, приводящим к возникновению дисбаланса РК является угол разворота сечений Δ_{OZ} вокруг оси OZ и величина смещений сечений Δ_x вдоль оси OX.

В четвёртом разделе сформированы регрессионные зависимости действующих на лопатку РК при работе изделия газовых сил от отклонения расположения профилей пера лопаток, нагрузок и сборочных параметров для дальнейшего определения дисбаланса. Регрессионные зависимости проекций сил F_Z и F_Y вдоль Oz и Oy для сектора РК первой ступени КНД, соответственно подставлены в виде:

$$F_Z = 6,34\Delta_x + 1,78\Delta_y + 87,54\Delta_{OZ} + 48,59h - 6,02 \cdot 10^2; \quad (11)$$

$$F_Y = -4,27\Delta_x - 0,81\Delta_y - 65,65\Delta_{OZ} - 40,12h + 8,33 \cdot 10^2. \quad (12)$$

Для выражений (11) и (12) была проведена оценка точности расчёта проекций сил. Погрешность при оценке величин сил, относительно разработанной КЭ модели, не превысила 0,2%.

Третья глава посвящена исследованию влияния эксплуатационных и технологических факторов на величину дисбаланса РК.

В первом разделе приведено описание последовательности исследований, проводимых для верификации этапа расчёта неуравновешенных сил методики создания параметрической модели для оценки дисбаланса РК. Работа проводилась на специально спроектированных и изготовленных макетных образцах. Последовательность проведения верификации представлена в виде блок-схемы на рисунке 7.

Исходными параметрами для расчёта крыльчаток выступали характеристики разработанного мобильного балансировочного станка: частота вращения вала $n=5800$ об/мин; мощность на валу $P=100$ Вт; момент на валу $M_k=0,17$ Н·м; наружный диаметр крыльчатки $D=84$ мм. В результате расчёта в модуле Ansys Vista AFD сформирована геометрия пера лопатки и определены следующие параметры крыльчатки: расход воздуха $G_k=0,195$ кг/с, полное давление за РК $P^*=800$ Па, количество лопаток выбрано 7 шт. Крыльчатки имеют малые габариты, вследствие чего их дисбаланс, вызванный неуравновешенной газовой силой, имеет малые значения. 3D-модель крыльчатки приведён на рисунке 8. В связи с этим были существенно увеличены отклонения расположения двух лопаток относительно их номинального положения. Изменённые параметры крыльчаток №2, №3 и №4 относительно номинальной (№1) представлены в таблице 1. Измерение геометрии аэродинамических поверхностей крыльчаток выполнялось на оптическом сканере



Рисунок 7 – Блок-схема верификации методики

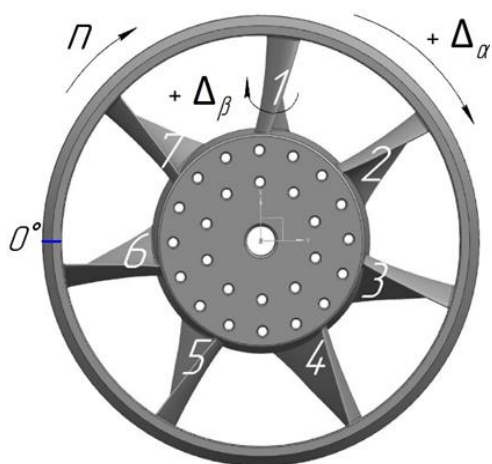


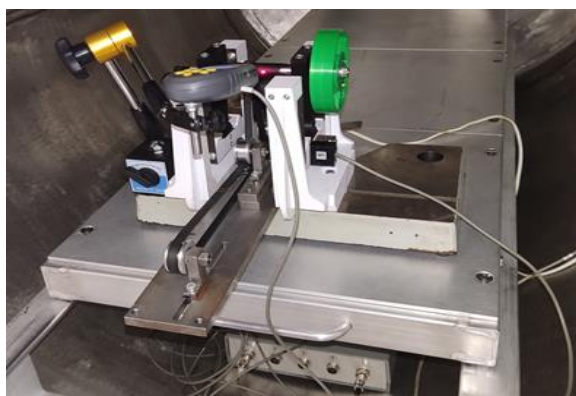
Рисунок 8 – 3D-модель крыльчатки

RangeVision PRO с заявленной точностью до 18 мкм.

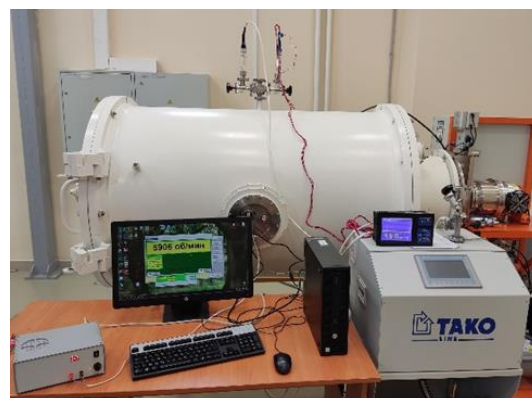
Таблица 1 – Отклонения расположения сечений профилей пера лопаток

№ лоп.	Угловое отклонение расположения лопатки относительно номинала Δ_α	Отклонение угла наклона лопатки относительно номинала Δ_β крыльчатки		
	крыльчатки №2, №3 и №4, град.	№2, град.	№3, град.	№4, град.
1	+5	-5	-10	-15
4	-5	5	10	15
2, 3, 5, 6, 7	0	0	0	0

Устранение механической составляющей суммарного дисбаланса крыльчаток выполнялось в аттестованной высоковакуумной камере ВВ-1 при остаточном давлении не более $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Измеренный при работе в атмосферных условиях дисбаланс крыльчатки будет вызван двумя составляющими: неравномерностью масс и действием неуравновешенной газовой силы. Измерение дисбаланса крыльчатки в вакууме покажет влияние только неравномерности масс. На рисунке 9 приведён мобильный балансировочный стенд, установленный в высоковакуумную камеру.



а



б

Рисунок 9 – Балансировочный стенд, установленный в высоковакуумную камеру ВВ-1: а) внутренний объём камеры; б) рабочее место оператора

Балансировка крыльчаток выполнялась с использованием разработанного мобильного балансировочного стенда, в состав которого входил прибор БалКом-4. Допустимый остаточный дисбаланс крыльчаток соответствовал классу точности балансировки G 0.4. Теоретико-экспериментальные данные, полученные при исследовании, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты балансировки крыльчаток

Параметр		Крыльчатка №		
		1	2	3
Дисбаланс, вызванный неуравновешенной газовой силой, D_a г·мм	Рассчитано	0,476	0,982	1,494
	Эксперимент	0,5	1,1	1,7
Абсолютное отклонение, г·мм		0,02	-0,17	-0,21
Относительное отклонение, %		-4,8	-10,7	-12,1
Масса корректирующего груза m , г	Рассчитано	0,0265	0,0528	0,0855
	Эксперимент	0,029	0,060	0,098
Абсолютное отклонение, г		-0,003	-0,007	-0,013
Относительное отклонение, %		-8,6	-12,0	-12,76
Угловое расположение корректирующего груза β , градус	Рассчитано	290	292	293
	Эксперимент	287	315	320
Абсолютное отклонение, градус		3	-23	-27
Относительное отклонение, %		1,1	-7,3	-8,4

Максимальное расхождение между теоретически оценённым и экспериментально измеренным дисбалансом крыльчаток, вызванным неуравновешенной газовой силой, не

превысило 13%. Увеличение отклонений расположений профилей лопаточного венца крыльчаток приводит к снижению точности оценки исследуемого дисбаланса.

В третьем разделе главы проведена оценка дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газодинамической силой, первой ступени КНД и параметров его компенсации на основе результатов измерений лопаток комплектуемого РК, полученных при производстве. При расчёте учитывался порядок раскладки лопаток с учётом их статистических моментов. Рассчитанный дисбаланс РК составил 101,8 г·мм, что по отношению к остаточному дисбалансу соответствует 17%. На рисунке 10 приведена векторная диаграмма газодинамических сил рассматриваемого РК с обозначенной результирующей силой F_{Σ} .

В четвёртой главе представлены материалы для практического внедрения результатов исследований при производстве, включая программное приложение и методику его использования.

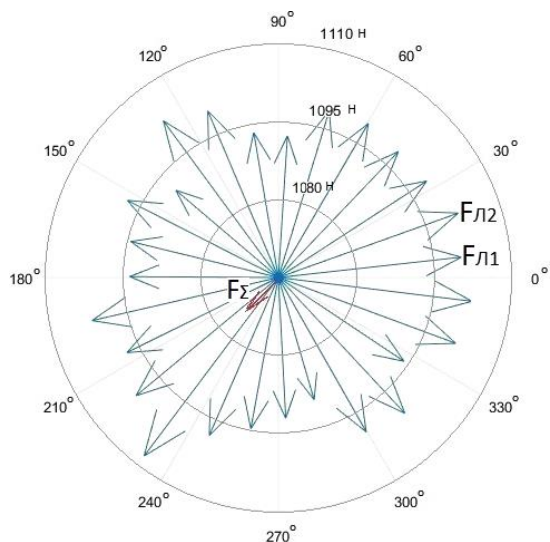


Рисунок 10 – Векторная диаграмма газодинамических сил РК

Первый раздел главы содержит описание разработанного программного приложения, предназначенного для оценки дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, первой ступени КНД и определения параметров его компенсации на основе измерения геометрии лопаток. Программное приложение разработано в среде MATLAB и позволяет: автоматизировать процесс взаимодействия с ANSYS Workbench, NX и Excel; проводить математические расчёты; выполнять архивацию данных вычисления.

Во втором разделе главы приведена методика использования программного приложения для снижения дисбаланса РК в условиях производства. Методика рассчитана для использования конструкторским персоналом и рабочими на производстве при балансировке

ГТД. В методике предусмотрено использование результатов измерений с помощью координатно-измерительных машин и универсальных средств измерения. Описаны действия, которые необходимо выполнять на этапах подготовки к эксплуатации. Показано применение программного приложения для загрузки статистических данных, расчёта дисбаланса РК и параметров его компенсации. Рассчитанный дисбаланс рассматриваемого РК первой ступени ГТД, вызванный неуравновешенной газодинамической силой, составил 101,8 г·мм, а измеренный на балансировочном станке полный дисбаланс – 328,4 г·мм. Полученный результат говорит о возможности снизить дисбаланс РК 1 ступени КНД на 31%.

Выводы и основные результаты работы

В работе представлено решение значимой научно-технической задачи снижения дисбаланса РК первой ступени КНД, вызванного неуравновешенной газовой силой, за счёт разработки метода, включающего методики и зависимость для определения условий выполнения балансировки узла.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Разработан метод снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД, использующий параметрическую и регрессионные модели, позволяющие определять условия компенсации дисбалансов на этапе выполнения сборочных работ при учёте отклонений расположения профилей пера лопаток. Метод учитывает сборочные параметры РК и действующие в нём нагрузки посредством разработанной методики создания параметрической модели для оценки дисбаланса РК. Использование метода показало возможность снижения дисбаланса РК 1 ступени КНД на 31%.

2. Разработана методика создания параметрической модели для оценки дисбаланса РК, отличающаяся совместным учётом отклонений расположения профилей пера лопаток в параметрическом виде, натяга по антивибрационным полкам, действующих при работе центробеж-

ной силы, температуры и давления газового потока. Методика позволяет проводить оценку деформаций лопаток и оценивать дисбаланс РК с учётом действующих при работе нагрузок и отклонений расположения профилей пера лопаток, представимых в параметрическом виде. Проведена верификация методики посредством создания параметрической модели крыльчаток. Максимальное расхождение между теоретически оценённым и экспериментально измеренным дисбалансом D_a крыльчаток компрессора не превысило 13%.

3. Сформированы регрессионные зависимости действующих на лопатку РК первой ступени КНД при работе изделия газовых сил от отклонения расположения профилей пера лопаток для дальнейшего определения дисбаланса. Зависимости позволят рассчитывать дисбаланс РК, вызванный неуравновешенной газовой силой, операторами балансировочного оборудования в цеховых условиях.

4. Проведены исследования по определению влияния нагрузок и отклонений расположения профилей пера на деформации лопаток и на дисбаланс РК первой ступени КНД при работе изделия. Проведена оценка дисбаланса РК первой ступени КНД, вызванного неуравновешенной газовой силой, и параметров его компенсации на основе результатов измерений лопаток, полученных с использованием координатно-измерительной машины при помощи разработанных методик. Рассчитанная величина дисбаланса, вызванного неуравновешенной газовой силой, для исследуемого РК составила 101,8 г·мм. Результаты исследования выявили, что наибольшее влияние на величину дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, оказывают факторы: разворот сечения вокруг оси Oz и натяг по антивибрационным полкам, которые учитываются при расчёте дисбаланса.

Разработано программное приложение и технологическая инструкция его использования для снижения дисбаланса РК ГТД, вызванного неуравновешенной газодинамической силой, которое ранее не определялось. Использование программного приложения и технологической инструкции позволило определить параметры балансировочного груза для компенсации дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газодинамической силой. Установка балансировочного груза на РК после выполнения балансировки ротора КНД позволит снизить вибрацию передней опоры.

Таким образом, поставленная цель достигнута, работа может считаться выполненной в полном объёме. Разработанное программное приложение позволяет рассчитывать дисбаланс РК, вызванный неуравновешенной газовой силой. Предложенные методики позволяют решать практические задачи, связанные с оценкой деформаций лопаток и дисбаланса РК первой ступени КНД. Они предназначены для использования конструкторским персоналом и рабочими в условиях производства предприятий.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в разработке параметрической модели оценки дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, и определения условий его компенсации всего КНД.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Кудашов, Е.В.** Методика оценки и снижения аэродинамического дисбаланса рабочих колёс вентиляторов ГТД / **Е.В. Кудашов**, И.А. Грачев, М.А. Болотов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 1. С. 85-97. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-85-97.

2. Печенина, Е.Ю. Разработка модели определения натягов по антивибрационным полкам лопаток / Е.Ю. Печенина, **Е.В. Кудашов**, В.А. Печенин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 79–90. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-79-90.

3. Елисеев, Ю.С. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, М.А. Болотов, В.А. Печенин, И.А. Грачев, **Е.В. Кудашов** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – № 2 (18). – С. 128–136. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-128-137

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus и WoS

4. Bolotov, M.A. Technological features of aircraft engine repair in digital production / M.A. Bolotov, I.A. Grachev, **E.V. Kudashov**, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1399. – №. 4. – С. 044114. DOI 10.1088/1742-6596/1399/4/044114

5. Grachev, I.A. Problems and ways to reduce measurement uncertainties in evaluating the geometric assembly parameters of gas turbine engine assemblies / I.A. Grachev, M.A. Bolotov, **E.V. Kudashov**, V.A. Pechenin // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 5. – С. 052035. DOI 10.1088/1742-6596/1515/5/052035

6. Grachev, I.A. Assignment of dimensional accuracy parameters of parts during assembly of aircraft repair engines / I.A. Grachev, M.A. Bolotov, **E.V. Kudashov** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 862. – № 3. – С. 032095. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/862/3/032095

7. Grachev, I.A. Comparative analysis of simulation options for the real geometry of the surfaces of gas turbine engine parts / I.A. Grachev, M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, **E.V. Kudashov**, K.E. Kharin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. Issue 1. DOI:10.1088/1742-6596/1745/1/012087

8. Grachev, I.A. Parameterized FEM for estimation of product unit assembly parameters / I.A. Grachev, **E.V. Kudashov**, M.A. Bolotov, N.D. Pronichev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1047. № 1. DOI:10.1088/1742-6596/1745/1/012087

9. **Kudashov E.V.** Methodology for assessing the aerodynamic imbalance of GTE impellers / **E.V. Kudashov**, M.A. Bolotov, I.A. Grachev, N.D. Pronichev // IV International Scientific Conference MIST: Aerospace-IV 2021: Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering. – 2022. – Vol. 1227. Doi:10.1088/1757-899X/1227/1/012004

Публикации в других изданиях

10. Грачев, И.А. Компьютерное моделирование сборки ротора компрессора низкого давления / И.А. Грачев, **Е.В. Кудашов**, М.А. Болотов // XXIII Международная научно-практическая конференция «Решетнёвские чтения», посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – 2019. – Ч. 1. – С. 173-175

11. Голев, Н.С. Методика обработки данных сканирования для создания действительных моделей деталей / Н.С. Голев, **Е.В. Кудашов**, Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин, М.А. Болотов // Девятая международная научная конференция «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство». – 2019. – Ч. 1. – С. 55-57

12. Грачев, И.А. Сравнительный анализ вариантов моделирования реальной геометрии поверхностей деталей ГТД / И.А. Грачев, М.А. Болотов, В.А. Печенин, **Е.В. Кудашов** // VI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020). – 2020. – Т. 3. – С. 627-637

13. Болотов, М.А. Исследование силового фактора при сборке рабочих колёс турбин ГТД / М.А. Болотов, **Е.В. Кудашов**, М.В. Янюкина // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». – 2021. – Т. 1. – С. 241-242.