

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе

д.ф.-м.н, доцент

И.Ф. Шарафуллин

« 6 » мая 2026г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» на диссертационную работу Кудашова Евгения Викторовича «Метод снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

1. Актуальность диссертационной работы

Значимым направлением повышения качества лопаточных машин является снижение дисбаланса их ротора. Нередко в процессе испытаний собранных изделий проявляется повышенная вибрация, для устранения которой требуется проведение полной или частичной разборки изделия и его узлов. Существует множество причин возникновения повышенной вибрации, одной из которых является наличие дисбаланса рабочих колёс (РК), вызванного неуравновешенной газовой силой. Данный дисбаланс также считать аэродинамическим. Указанный дисбаланс возникает из-за: 1) геометрической неидентичности перьев лопаток РК; 2) разброса величин деформаций перьев лопаток под действием центробежных и газовых сил, что в свою очередь приводит к различному изменению углов установки профилей и шагов; 3) разброса величин натягов по контактным поверхностям антивибрационных полок.

Геометрическая точность РК обеспечивается технологией их сборки и изготовления деталей. Наибольшее влияние на геометрическую точность РК оказывают его лопатки, которые являются сложнопрофильными и маложёсткими. Геометрические параметры РК изменяются в ходе работы изделий, что оказывают заметное влияние на уровень их вибрации.

Вызванный неуравновешенной газовой силой дисбаланс РК возможно снизить балансировкой на разгонно-балансировочных стендах, имитирующих близкие к рабочим условия. Евгений Викторович в своей работе предлагает метод для оценки и определения условий компенсации аэродинамического дисбаланса РК по результатам измерения геометрии деталей на этапе сборки.

2. Структура и содержание работы

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

Во **введении** автор обосновал актуальность темы исследования, сформулировал цель и задачи исследования, изложил научную новизну и практическую значимость работы, представил выносимые на защиту основные положения и сведения об апробации результатов работы.

В **первой главе** автор описал объект исследования и выполнил анализ существующего технологического процесса сборки и балансировки РК первой ступени ротора КНД, выявил его основные проблемы. Одной из проблем является повышенная вибрация ротора КНД, которая может быть вызвана неуравновешенной возбуждающей силой по причине неточности изготовления лопаток.

Автором выполнен обзор публикаций по проблемам: обеспечения заданной точности при сборке роторов газотурбинных двигателей (ГТД) и разработки моделей, позволяющих оценивать геометрическую точность изделий. По результатам проведённого обзора сделан вывод о целесообразности разработки метода для снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы.

Вторая глава состоит из четырёх разделов, каждый из которых направлен на решение отдельной задачи.

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. Разработанный метод может быть интегрирован в существующие технологические процессы предприятия без изменения структуры этапов сборки и балансировки изделия, при этом потребуется добавление одного из этапов.

Во втором разделе приведено описание методики создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД, которая используется в разработанном методе. Методика включает использование трёх разработанных конечно-элементных моделей. Эта особенность методики, позволяет учитывать не только геометрические отклонения лопаток, вызванные погрешностью изготовления, но и деформации возникающие в процессе работы РК.

В третьем разделе главы проведено 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. Выполненные автором исследования позволили выявить наиболее значимые факторы, влияющие на появление дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой.

В четвертом 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 исследуемого дисбаланса.

В **третьей главе** приведены результаты исследования влияния эксплуатационных и технологических факторов на величину дисбаланса РК. Проведена верификация методики создания параметрической модели оценки дисбаланса РК ГТД, вызванного неуравновешенной газовой силой на специальных разработанных образцах демонстраторах - крыльчатках. Рассчитанная величина дисбаланса РК показала удовлетворительную корреляцию с результатами, полученными на балансировочном станке. Выполнена оценка дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газодинамической силой, первой ступени КНД ГТД и параметров его компенсации на основе результатов измерений лопаток комплектуемого РК, полученных при производстве. Эксперимент показал необходимость учёта дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газодинамической силой.

В **четвертой главе** представлено два раздела. В первом разделе представлено описание разработанного программного приложения, позволяющего: 1) оценивать дисбаланс РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, первой ступени КНД и определения параметров его компенсации на основе измерения геометрии лопаток; 2) определять параметры компенсации дисбаланса. Программное приложение и его интерфейс разработаны в среде MATLAB.

Во втором разделе четвертой главы представлена методика использования программного приложения для снижения дисбаланса РК в условиях производства.

В **заключении** диссертационной работы перечислены основные научные и практические результаты.

3. Научная новизна

Следует отметить наиболее существенные научные результаты диссертационной работы:

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. 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. 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.

Направленность и применимость полученных результатов для совершенствования этапа технологической подготовки изделия соответствует 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» паспорта специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

4. Практическая значимость работы

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

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Перспектива дальнейшего развития работы заключается в разработке метода, предназначенного для определения оценки дисбаланса РК, вызванного неуравновешенной газовой силой, и определения условий его компенсации всего ротора. Полученные результаты работы, при учёте их адаптации, могут быть использованы на предприятиях двигателестроения, таких как ПАО «Кузнецов», АО «ОДК-ПМ», ПАО «ОДК-УМПО» при выполнении балансировки роторов газотурбинных двигателей.

6. Замечания по диссертационной работе

1. Используемая в работе формулировка «дисбаланс РК, вызванный неуравновешенной газовой силой» по описываемой сути близка к формулировке «аэродинамический дисбаланс РК». Было бы целесообразно рассмотреть возможность использования в работе более краткой и удобной формулировки «аэродинамический дисбаланс РК».

2. Результаты измерений геометрии профилей лопаток являются решающими в расчёте рассматриваемого в работе дисбаланса РК. Существенное влияние на точность измерений геометрии профилей лопаток, при использовании координатно-измерительных машин, оказывает последовательность выполнения измерений. Автором не описана последовательность выполнения измерений, а также не даны оценки неопределённостей результатов измерений.

3. Исследование влияния нагрузок и отклонений расположения профилей пера лопаток на дисбаланс РК в рабочем состоянии выполнялось для одного выбранного РК КНД. С целью обобщения и демонстрации возможностей разработанного метода целесообразно было бы выполнить теоретические расчёты для РК других изделий.

4. Автором не приведены ограничения по возможности использования метода, включая типы и конструктивные параметры РК, габаритные размеры, возможность внесения корректирующих масс и иное.

5. В п. 2.2 приводится описание создание конечно-элементной модели сектора РК ссылаясь на рекомендации, приведённые во внешних источниках, однако не приведены параметры сетки конечных элементов, используемой в расчётах.

Заключение

Диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой, содержит решение актуальной научно-технической задачи снижения дисбаланса РК ГТД посредством совместного учёта неравномерности газовых сил в компрессорной решётке и геометрических отклонений профилей пера лопаток.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает её содержание. Результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично в процессе научной деятельности.

Диссертация «Метод снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы» выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (пп.9-12 Положения о присуждении учёных степеней), а её автор Кудашов Евгений Викторович заслуживает присуждения учёной степени

кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв обсуждены и одобрены на заседании научно-технического совета кафедры авиационных двигателей ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» 5 мая 2026 года, протокол № 36. На заседании присутствовало 20 человек. В том числе 4 доктора технических наук. Результаты голосования: «за» - 20, против - 0, воздержалось - 0.

Заведующий кафедрой «Авиационные двигатели», к.т.н., доцент (кандидатская диссертация защищена по специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов)



Зырянов А.В.

Отзыв составил: профессор кафедры «Авиационные двигатели», д.т.н., профессор (докторская диссертация защищена по специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов)



Кривошеев И.А.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Почтовый адрес:

450076, Республика Башкортостан, г.о. город Уфа, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32

тел.: 8(347) 272-63-70, факс: 8(347) 273-67-78,

e-mail: rector@uust.ru



*Подписи Зырянова А.В. и Кривошеева И.А. удостоверено
вед. организации ко кафедр*