

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора кафедры «Авиационные двигатели»
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Нихамкина Михаила Шмеровича

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 ученой степени кандидата технических наук

по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и

энергоустановки летательных аппаратов»

1. Актуальность темы исследования

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в гражданской и военной авиации. Среди множества требований, предъявляемых к ГТД, особое внимание уделяется уровню их вибрации. Основной причиной вибрации принято считать действие центробежных сил неуравновешенных масс деталей роторов. При изготовлении двигателей выполняется селективная сборка и балансировка отдельных рабочих колес, а также балансировка собранных роторов. Балансировка выполняется не в составе двигателя, а на балансировочных станках при частоте вращения ротора многократно ниже рабочей. В результате неучтенным остается влияние реальных нагрузок, действующих на элементы ротора, в частности газодинамических сил, действующих на рабочие лопатки. В реальных условиях имеет место неуравновешенность этих газодинамических сил, которая подобно неуравновешенности центробежных сил масс ротора вызывает вибрации. Указанный эффект проявляется в роторах с крупногабаритными лопатками и во многом определяется отклонениями реальной геометрии лопаток от номинальной. Тема диссертации Кудашова Е.В., посвященной исследованию влияния на вибрации газодинамической неуравновешенности и совершенствованию балансировки роторов, несомненно, актуальна.

2. Общая характеристика работы

Диссертационная работа Кудашова Е.В. посвящена снижению дисбаланса рабочих колес (РК) за счёт разработки метода балансировки, учитывающего неравномерности газодинамических сил в компрессорной решётке и геометрических отклонений профилей пера лопаток. Предложенный автором метод опирается на создание и использование в расчетах параметрической модели лопаток и расчете газодинамического дисбаланса РК. На основании многократных расчетов получены регрессионные зависимости действующих на лопатки РК газовых сил от отклонений геометрии пера лопаток и сборочных параметров.

Входящий № 206-4301
Дата 14 МАЙ 2026
Самарский университет

Проведена экспериментальная верификация метода с использованием специально спроектированных и изготовленных модельных рабочих колес, характеризующихся неидентичностью геометрии их лопаток. Разработано программное приложение и технологическая инструкция его использования для снижения дисбаланса РК газотурбинных двигателей, вызванного неуравновешенной газодинамической силой. Результаты работы внедрены в ПАО «ОДК-Кузнецов».

3. 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 страницы, 45 рисунков и 18 таблиц. Структура диссертационной работы логичная, подчинена решению поставленных задач.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе приведен анализ публикаций по теме диссертации, сформулированы задачи исследования. Сделан вывод о необходимости разработки методики оценки и снижения газодинамического дисбаланса РК с учётом производственных погрешностей их изготовления и сборки, а также деформаций деталей, вызванных эксплуатационными факторами.

Во второй главе изложен метод и результаты определения газодинамического дисбаланса РК на основе конечно-элементного моделирования течения газа в РК с учетом отклонения геометрии лопаток от номинальной, деформации лопаток при сборке и эксплуатационном нагружении. Методика включает в себя разработку параметрической модели лопатки и последовательность газодинамических и прочностных конечно-элементных расчетов газового потока в межлопаточном канале и деформаций лопаток под действием эксплуатационных нагрузок и нагрева. Выявлены основные геометрические и эксплуатационные факторы, влияющие на неуравновешенность газодинамических сил. На основании большого объема расчетов получены регрессионные зависимости газовых сил от отклонения расположения профилей пера лопаток, нагрузок и сборочных параметров для дальнейшего определения дисбаланса. Такое моделирование выполнено, насколько нам известно, впервые.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию, направленному на верификацию описанной выше расчетной методики. Исследование проведено на модельных РК на специально разработанной установке на базе балансировочного стенда, помещенного в вакуумную камеру. Постановка и техника эксперимента обладают

научной новизной. По результатам проведенных экспериментов показано хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

В четвёртой главе представлены материалы для практического внедрения результатов исследований при производстве. Разработано программное приложение, предназначенное для оценки дисбаланса, вызванного неуравновешенной газовой силой, и определения параметров его компенсации на основе измерения геометрии лопаток. Использование результатов продемонстрировано на примере РК первой ступени компрессора низкого давления ТРДД.

В заключении приведены выводы и основные результаты работы.

4. Научная новизна и новые результаты

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений и заключается в том, что впервые получены следующие результаты:

1. Разработан метод снижения дисбаланса РК, 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.

5. Обоснованность и достоверность основных результатов исследований

Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом целей. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановки задач исследования и использованием соответствующего математического аппарата для их решения. Работа выполнена на основе известных численных методов, обладающих высокой точностью, при проведении вычислительных экспериментов. Основным доказательством достоверности разработанного метода является хорошее (порядка

13%) согласование полученных автором экспериментальных данных для модельного рабочего колеса с результатами расчетного моделирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы отражены в 13 публикациях, из которых 3 - в научных журналах из перечня ВАК РФ, 6 - в статьях в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты исследований были представлены на конференциях различного уровня, включая международные. Поэтому считаю, что диссертационная работа Кудашова Е.В. в достаточной мере апробирована.

Диссертация и автореферат написаны ясным и технически грамотным языком. Работа подробно и четко излагает постановку задач, методы их решения и полученные результаты. Автореферат адекватно передает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата соответствует установленным стандартам.

6. Замечания по содержанию и оформлению работы.

1. В традиционном представлении дисбаланс - это мера неравномерного распределения массы, равная произведению неуравновешенной массы на её эксцентриситет. Неуравновешенность газодинамических сил может называться дисбалансом, как это делает автор, лишь условно, это некий эквивалент дисбаланса. Автору, наверное, следовало привести подробное разъяснение по этому поводу.

2. В главе 2 анализ напряженно-деформированного состояния РК описан поверхностно. В частности, не сформулированы граничные условия на поверхности контакта полка лопатки. Если на этих поверхностях рассматривается наличие сухого трения, необходимо обосновать выбор соответствующей модели, описать ее.

3. Автор неоднократно (см., например, стр. 53) называет перемещения деформированной лопатки деформациями и даже ошибочно употребляет понятие «вектор деформации».

4. На рисунке 3.5 показана картина линий токов газового потока. Пояснений к указанному рисунку не приводится.

5. Размер шрифта на осях рисунка 2.24 не соответствует требованиям читаемости.

Отмеченные замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость результатов, в диссертации не обнаружено.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационная работа на тему: «Метод снижения дисбаланса рабочих колёс ГТД с учётом геометрических отклонений профилей пера лопаток и неравномерности газовой силы»

представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработан метод, направленный на снижение дисбаланса роторов.

Исходя из вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Кудашова Е.В. является завершённым научным исследованием, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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».

Официальный оппонент
профессор каф. «Авиационные двигатели»
Пермского национального исследовательского
политехнического университета (ПНИПУ),
доктор технических наук (специальность 05.07.05),
профессор



Нихамкин Михаил Шмерович

Телефон: +7(342)239-13-61,

e-mail: nikhamkin@mail.ru

Почтовый адрес организации:

614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» <http://www.pstu.ru>

Подпись Нихамкина Михаила Шмеровича

удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ,

канд. ист. наук доцент



Макаревич Владимир Иванович

4.05.2016