



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор -
проректор по науке
кандидат юридических наук, доцент

А.И. Розенцвайг

2026 г.



№ _____
На № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

на диссертационную работу Шевякова Артёма Олеговича
на тему «Многодисциплинарная оптимизация рабочих лопаток вентилятора
газотурбинного двигателя с учетом производственных отклонений»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация Шевякова Артёма Олеговича посвящена решению проблемы,
связанной с влиянием технологической дисперсии геометрических параметров рабочих
лопаток вентилятора на их прочностные и аэродинамические характеристики, а именно
разработке методики многодисциплинарного анализа чувствительности, позволяющей
количественно оценить влияние производственных отклонений на эффективность
вентиляторной ступени газотурбинного двигателя (ГТД) и оптимизировать проектные
решения с учетом реальных технологических возможностей производства.

Актуальность темы диссертационной работы

В условиях санкционных ограничений и курса на импортозамещение в российской
авиационной промышленности приоритетное значение приобретает разработка и освоение
серийного производства отечественных ГТД, в том числе перспективных двигателей

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«03» 09 2026 г.

ПД-35, ПД-14, ПД-8 и ТВ7-117СТ-01. Ключевым элементом высокоэффективных двухконтурных двигателей являются рабочие лопатки вентилятора, характеризующиеся сложной пространственной геометрией и предъявляемые к ним жесткие требования по массе, прочности, аэродинамической эффективности и газодинамической устойчивости.

Однако полученные в ходе проектирования оптимальные конструктивные решения могут оказаться недостаточно реализуемыми в условиях серийного производства. Это связано с тем, что традиционные детерминированные методы оптимизации не учитывают возможные производственные отклонения геометрии пера лопатки, которые даже в пределах заданных допусков оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) и аэродинамические характеристики вентиляторной ступени. Расчет каждой отдельно взятой конфигурации лопатки с учетом технологического разброса является самостоятельной задачей, решение которой аналитическими или численными методами на этапе проектирования сопряжено с высокой вычислительной сложностью и требует разработки специализированных подходов.

С учетом сказанного разработка методики многодисциплинарного анализа чувствительности рабочих лопаток вентилятора к производственным отклонениям, позволяющей системно оценивать влияние технологической дисперсии на прочность и аэродинамику, является актуальной задачей, имеющей важное значение для повышения надежности, энергоэффективности и технологичности перспективных ГТД.

Научная новизна полученных результатов

Автором проведен анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии рабочих лопаток вентиляторных ступеней с учетом комплексных требований к энергоэффективности, статической прочности, технологичности и устойчивости к факторам неопределенности, включая производственные отклонения и эксплуатационные воздействия. В отличие от традиционных методик, предложенный подход учитывает многодисциплинарную природу задачи и позволяет проводить системную оценку влияния технологической дисперсии.

На основе статистического анализа измерений серийных партий лопаток с использованием координатно-измерительной машины разработаны методика прецизионного контроля геометрических параметров профиля пера и модели производственных отклонений. Идентифицированы и ранжированы ключевые геометрические параметры (смещения центра тяжести T_x и T_y , угол установки Θ , максимальная толщина профиля E , толщины у входной и выходной кромок e_1 и e_2), оказывающие определяющее влияние на НДС и аэродинамические характеристики вентиляторной ступени.

Разработана комплексная методика геометрической параметризации рабочих

лопаток вентилятора, основанная на использовании аналитических зависимостей и топологических связей между элементами модели. Создан специализированный программный комплекс «BladeToolMAI» в среде CAD-системы Siemens NX, обеспечивающий автоматизированное построение параметрических 3D-моделей лопаток «холодной» формы по данным координатно-измерительных мероприятий, а также программный модуль «FindSweepLayers» в среде ANSYS Workbench, позволяющий автоматически формировать модели «горячей» геометрии с учетом центробежных и температурных деформаций. Это позволило впервые реализовать замкнутый цифровой цикл «измерение-прочностной расчет-геометрическая реконструкция-аэродинамический анализ».

Предложена и реализована методика многодисциплинарного анализа чувствительности, позволяющая установить количественные и качественные закономерности влияния геометрических параметров лопаток на их НДС и аэродинамические характеристики с учетом реальных отклонений формы. Методика интегрирует конечно-элементное моделирование, трехмерную аэродинамику и параметрический анализ в единую расчетную схему.

Впервые на основе серии расчетов 37 параметрических моделей лопаток (включая номинальную и предельные конфигурации) получены количественные оценки чувствительности прочностных и газодинамических показателей к единичным и комбинированным геометрическим отклонениям. Установлено, что наиболее существенное влияние на перемещения лопатки оказывает смещение центра тяжести (параметр T_x и T_y) в периферийной зоне и толщина выходной кромки (параметр e_2), а на аэродинамические характеристики – угол установки профиля (параметр Θ) и максимальная толщина профиля (параметр E). Впервые показано, что в пределах технологических допусков отклик аэродинамических характеристик на геометрические возмущения может быть аппроксимирован линейными зависимостями, что позволяет существенно сократить вычислительные затраты при многовариантной оптимизации.

Перечисленные результаты исследования свидетельствуют о новаторских решениях с доказательной базой в области многодисциплинарного проектирования лопаточных аппаратов ГТД с учетом технологических неопределенностей.

Теоретическая значимость работы состоит в формулировании и обосновании системного подхода к учету производственных отклонений при многодисциплинарной оптимизации рабочих лопаток вентилятора. Доказано, что традиционные детерминированные методы оптимизации, не учитывающие технологическую дисперсию, могут приводить к неоптимальным решениям с точки зрения стабильности эксплуатационных характеристик в условиях серийного производства. Разработанная методика анализа чувствительности позволяет выявить критические геометрические

параметры и установить количественные закономерности их влияния на прочность и аэродинамику, что создает научную основу для перехода от пассивного контроля допусков к адаптивным стратегиям проектирования и сборки лопаточных венцов.

Практическая значимость работы

Разработанная автором методика многодисциплинарного анализа чувствительности и созданные программные инструменты (программные комплексы «BladeToolMAI» и «FindSweepLayers») позволяют на этапе проектирования и доводки двигателя системно учитывать влияние технологического разброса геометрии лопаток на их работоспособность и эффективность.

Представленная методика позволяет строить замкнутый цифровой цикл «измерение – прочностной расчет - геометрическая реконструкция - аэродинамический анализ», что обеспечивает повышение точности прогнозирования эксплуатационных характеристик вентиляторной ступени за счет использования «горячих» моделей геометрии, учитывающих реальные термомеханические деформации.

Полученные результаты использованы в процессе модернизации компрессора низкого давления двигателя регионального самолета на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн», что подтверждено актами внедрения. Разработанные методики и программные средства могут быть рекомендованы предприятиям отрасли (ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «ОДК-Авиадвигатель», «ОКБ им. А.Льюльки») при проектировании новых конструкций вентиляторных ступеней и оптимизации допусков на изготовление лопаток с целью обеспечения стабильности тяговых и экономических показателей двигателей в серийном производстве.

Достоверность результатов подтверждается соблюдением методологических принципов численного моделирования, включая верификацию конечно-элементных и аэродинамических моделей, контроль сходимости решений по сетке и по итерациям, а также адекватность граничных условий и физических моделей. В работе использованы сертифицированные программные комплексы ANSYS Workbench и NUMECA Fine/Turbo, широко применяемые в авиадвигателестроении и прошедшие многоуровневую валидацию на промышленных и экспериментальных задачах. Применение откалиброванных моделей турбулентности, использование геометрии «горячей» формы с учетом эксплуатационных деформаций, а также сопоставление с базовыми расчетными и экспериментальными данными (в том числе верификация полной модели компрессора с экспериментальными данными ПАО «ОДК-Сатурн») дополнительно подтверждают корректность и надежность полученных результатов.

Публикации основных результатов диссертации

Основное содержание диссертации отражено в 18 научных работах, из которых 5 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по

научной специальности 2.5.15., 3 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 1 статья в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Web of Science, 7 тезисов докладов на научных конференциях. Также автором получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание диссертации, ее завершенность, замечания по оформлению

Диссертационная работа Шевякова А.О. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 194 страницы, включая 151 рисунок, список литературы, содержащий 123 наименования. Существенные замечания по оформлению отсутствуют.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель, основные задачи и методы их решения, приводятся выносимые на защиту положения и краткое содержание работы по главам.

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы проектирования вентиляторных ступеней авиационных ГТД, выявлены ограничения традиционных детерминированных методов оптимизации, не учитывающих производственные отклонения, и обоснована необходимость перехода к междисциплинарному подходу с учетом технологической дисперсии. Рассмотрены классические и современные методы аэродинамического профилирования лопаточных машин, показана их эволюция от одномерных расчетов к автоматизированным системам трехмерной оптимизации. По результатам анализа разработана общая методика диссертационного исследования, реализованная в виде замкнутого вычислительного цикла.

Во второй главе представлена методика контрольно-измерительных мероприятий пера лопаток с использованием координатно-измерительной машины COORD3 HERA NT, включающая алгоритмы сканирования, припасовки измеренных данных к номинальной CAD-модели и разделения погрешностей положения и формы. На основе статистического анализа выборок измерений серийных лопаток установлены законы распределения ключевых геометрических параметров и оценены их корреляционные связи, что позволило обосновать рациональный набор управляемых переменных для параметрических моделей.

В третьей главе разработана комплексная методика геометрической параметризации рабочих лопаток вентилятора. Создан программный комплекс «BladeToolMAI» в среде CAD-системы Siemens NX для автоматизированного построения параметрических 3D-моделей лопаток «холодной» формы по данным КИМ. Предложен и реализован программный модуль «FindSweepLayers» в среде CAE-системы ANSYS Workbench, позволяющий автоматически извлекать координаты деформированных узлов из результатов прочностного расчета и формировать параметрические модели лопаток

«горячей» формы, учитывающие влияние центробежных и температурных нагрузок. Сформирована база из 37 параметризованных «горячих» моделей, соответствующих предельным значениям геометрических допусков в характерных поперечных сечениях.

В четвертой главе выполнена количественная оценка влияния технологического разброса геометрии рабочих лопаток вентилятора на их напряженно-деформированное состояние. Исследование базируется на серии статических прочностных расчетов 37 параметрических моделей лопаток в «холодном» состоянии. Проведенный анализ чувствительности позволил установить, что доминирующее влияние на НДС оказывают геометрические отклонения, изменяющие положение центра масс сечения и локальную толщину профиля. Выявлена дифференцированная чувствительность прочностных характеристик к различным типам геометрических отклонений. Установлено, что связь между геометрическими параметрами и прочностными характеристиками носит различный характер: для параметров T_x , T_y и e_2 зависимость отклика может быть описана линейными моделями, тогда как варьирование параметров Θ , E и e_1 демонстрирует нелинейное поведение.

В пятой главе выполнена количественная оценка влияния технологического разброса геометрии рабочих лопаток вентилятора на их аэродинамические характеристики. Исследование базируется на серии газодинамических расчетов 37 параметрических моделей лопаток в «горячем» состоянии. Проведен анализ чувствительности для единичных и комбинированных геометрических отклонений в одноканальной и двухканальной постановках. Установлено, что доминирующее влияние на изменение массового расхода оказывает варьирование максимальной толщины профиля (E) в периферийном сечении, на степень повышения давления – угол установки (Θ), на тягу – угол установки (Θ) в периферийном сечении. Анализ комбинированных отклонений показал, что наиболее существенной реакцией является изменение тяги. Переход к двухканальной постановке позволил выявить эффект порядка установки лопаток в венце.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе, сформулированы научные и практические рекомендации.

Замечания по диссертации. При общей положительной оценке диссертационной работы можно отметить следующие замечания:

1. В представленных в диссертационной работе материалах недостаточно подробно рассмотрен вопрос влияния производственных отклонений на долговечность и усталостную прочность рабочих лопаток (в частности, влияние отклонений на циклическую долговечность в условиях переменных нагрузок). Основное внимание уделено статической прочности и аэродинамике, что, однако, не снижает ценности работы.

2. В автореферате не приведены конкретные числовые значения коэффициентов чувствительности для всех исследуемых параметров (в таблицах указаны процентные изменения, но отсутствуют абсолютные значения), что затрудняет оценку масштаба влияния отклонений без обращения к полному тексту диссертации.

3. В работе отсутствует прямое сравнение предложенных линеаризованных моделей чувствительности с результатами полномасштабных нелинейных расчетов для комбинированных отклонений, что позволило бы более наглядно продемонстрировать границы применимости линеаризованного подхода.

4. Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанная методика многодисциплинарного анализа чувствительности и созданные программные инструменты («BladeToolMAI», «FindSweepLayers») могут быть рекомендованы для использования в конструкторских бюро и научно-исследовательских организациях авиадвигателестроительной отрасли при проектировании новых и модернизации существующих вентиляторных ступеней ГТД, а также при оптимизации допусков на изготовление лопаток и разработке адаптивных стратегий сборки лопаточных венцов с целью стабилизации выходных характеристик двигателей в серийном производстве.

Заключение

Диссертация Шевякова Артёма Олеговича на тему: «Многодисциплинарная оптимизация рабочих лопаток вентилятора газотурбинного двигателя с учетом производственных отклонений», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, в целом выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, направленной на решение актуальной задачи в области авиационного двигателестроения. Приведенные результаты диссертационной работы можно квалифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическое значение.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает критериям, установленным п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Шевяков Артём Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв на диссертационную работу Шевякова Артёма Олеговича «Многодисциплинарная оптимизация рабочих лопаток вентилятора газотурбинного

двигателя с учетом производственных отклонений» подготовлен профессором кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов доктором технических наук, профессором Новиковым Дмитрием Константиновичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета

«26 августа» 2026 года, протокол № 1.

Заведующий кафедрой
конструкции и проектирования
двигателей летательных аппаратов
Самарского университета,
доктор технических наук,
профессор

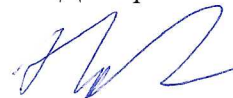
Фалалеев Сергей Викторович



«26» августа 2026 года

Профессор кафедры
конструкции и проектирования
двигателей летательных аппаратов
Самарского университета,
доктор технических наук,
профессор

Новиков Дмитрий Константинович



«26» августа 2026 года

Контактная информация:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Сокращенное наименование организации: Самарский университет.

Адрес: Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д.34.

Телефон (приемная ректора): +7 (846) 335-18-26; e-mail: ssau@ssau.ru

Официальный сайт: <https://ssau.ru/>

Сотзвтом ознакомен
03.09.2026г.

