



На правах рукописи

Шевяков Артём Олегович

**МНОГОДИСЦИПЛИНАРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК
ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОТКЛОНЕНИЙ**

Специальность 2.5.15.

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 203 «Конструкция и проектирование двигателей».

**Научный
руководитель:** **Равикович Юрий Александрович,**
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Колотников Михаил Ефимович,**
доктор технических наук, НИИ механики МГУ
им. М.В.Ломоносова, ведущий научный сотрудник

Милешин Виктор Иванович,
кандидат физико-математических наук, ФАУ «ЦИАМ им.
П.И.Баранова», начальник отделения «Аэродинамика
лопаточных машин воздушно-реактивных двигателей и
газотурбинных установок»

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

Защита диссертации состоится 22 сентября 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188548.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
доктор технических наук, доцент

Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На современном этапе российская авиационная промышленность сталкивается с рядом значимых вызовов, оказывающих существенное влияние на ее дальнейшее развитие. Одним из ограничений для технологического и производственного совершенствования отрасли является реализуемая рядом иностранных государств санкционная политика. Из-за этого значительно сократились возможности импорта критически важных технологий, комплектующих, материалов и оборудования.

В процессе совершенствования конструктивных элементов газотурбинных двигателей (ГТД) с высокой степенью двухконтурности особое внимание уделяется аэродинамическому совершенству вентиляторных ступеней компрессора низкого давления (КНД).

Одной из наиболее ответственных деталей вентиляторной ступени является рабочая лопатка вентилятора (РЛВ), характеризующаяся сложной пространственной геометрией, которая превосходит по уровню конструктивной и технологической сложности большинство других элементов проточной части двигателя. Освоение серийного производства таких лопаток связано с решением широкого круга задач, включая управление неопределенностями исходных параметров и междисциплинарную оптимизацию их геометрических характеристик.

С развитием технологий авиационного двигателестроения предъявляются все более жесткие требования к РЛВ: минимально возможная масса, высокие прочностные характеристики, достижение максимального значения КПД в заданной рабочей точке и обеспечение газодинамической устойчивости.

Однако полученные в ходе проектирования оптимальные конструктивные решения могут оказаться недостаточно реализуемыми в условиях производства. Это связано с тем, что при проектировании не учитываются возможные производственные отклонения геометрии пера РЛВ, оказывающие влияние на эффективность даже в пределах заданных допусков.

Решение поставленной задачи возможно на основе применения междисциплинарного анализа чувствительности показателей эффективности РЛВ к геометрическим отклонениям, обусловленным технологической дисперсией при изготовлении. Данный подход обеспечивает оценку влияния варьируемых параметров формы лопатки на характеристики работоспособности конструкции, включая напряженно-деформированное состояние (НДС) и аэродинамическую эффективность. Он позволяет выявить количественные и качественные закономерности реакции системы на

производственные погрешности, ранжировать параметры по степени влияния и обосновать вклад каждого из них в изменение интегральных показателей.

Степень разработанности темы. Обзор научных публикаций свидетельствует о значительном интересе исследователей к вопросам моделирования рабочих процессов и совершенствования проточной части вентиляторных ступеней. Вклад в развитие этой области внесли научные коллективы ряда ведущих отечественных предприятий и образовательных учреждений, включая: АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «ОДК-Авиадвигатель», «ОКБ им. А.Льюльки», ФАУ «ЦИАМ им. П.И.Баранова», Московский авиационный институт, РГАТУ им. П.А.Соловьева, УГАТУ, а также Самарский университет. Среди отечественных специалистов, чьи труды получили признание в данной сфере, следует выделить Ю.Н.Шмотина, Р.В.Храмина, И.Н.Егорова, Г.В.Кретирина, К.С.Федечкина, М.Е.Колотникова, В.И.Милешина, А.Б.Агульника. Важные результаты в этой области также получены зарубежными учеными, в частности Ч.Хиршем и Н.Кампсти.

Несмотря на активную научную деятельность и обширную базу исследований, посвященных совершенствованию отдельных элементов КНД, комплексные исследования, направленные на оптимизацию вентиляторных ступеней в полной трехмерной постановке, остаются малочисленными. Основными ограничивающими факторами являются высокая вычислительная сложность таких задач и трудности, связанные с эффективной параметризацией всей проточной части при ограниченном количестве управляющих параметров.

Объектом исследования выступают РЛВ авиационного ГТД, функциональные характеристики которых оцениваются с учетом наличия геометрических отклонений, обусловленных технологической дисперсией при изготовлении.

Цель исследования. Разработка и исследование методики оценки аэродинамических характеристик вентилятора с учетом геометрических отклонений пера лопаток, обусловленных технологической дисперсией при изготовлении, за счет применения современных расчетных комплексов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии РЛВ авиационных ГТД, с учетом требований к энергоэффективности, прочности, технологичности и устойчивости к различным факторам неопределенности.
2. Идентификация ключевых геометрических параметров РЛВ, оказывающих наибольшее влияние на аэродинамические характеристики вентиляторной ступени.

3. Формирование моделей производственных отклонений, включая статистический анализ реальных законов распределения геометрических параметров лопаток, полученных на основе данных серийного производства.

4. Разработка методики многодисциплинарного анализа чувствительности РЛВ для оценки влияния ключевых геометрических параметров их профиля на НДС и аэродинамику с учетом технологических отклонений при изготовлении.

5. Численная реализация многодисциплинарной задачи анализа чувствительности с применением современных вычислительных алгоритмов и программных комплексов.

6. Анализ чувствительности проектных решений к вариациям входных параметров, а также оценка устойчивости полученных оптимальных конфигураций в условиях реального производственного разброса геометрических параметров.

7. Формирование рекомендаций по внедрению разработанных методик и оптимальных решений в инженерную практику проектирования и производства лопаточных аппаратов высокой степени сложности.

Методология и методы исследования. Применяемая методология сочетает численное моделирование с использованием современных программных комплексов (ANSYS, NUMECA), статистический анализ данных измерений реальных партий лопаток, а также методы аппроксимации и анализа многомерных зависимостей, что обеспечивает достоверность и практическую значимость полученных результатов.

Научная новизна. Основные положения, определяющие научную новизну исследования, заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии РЛВ авиационных ГТД с учетом комплексных требований к энергоэффективности, надежности, технологичности и устойчивости к факторам неопределенности, включая производственные отклонения и эксплуатационные воздействия. В отличие от традиционных методик, предложенный анализ учитывает многодисциплинарную природу задачи.

2. На основе статистического анализа измерений разработаны методика прецизионного контроля геометрических параметров профиля пера РЛВ с использованием координатно-измерительной машины (КИМ) и модели производственных отклонений, идентифицированы и ранжированы ключевые геометрические параметры лопаток, оказывающие определяющее влияние на НДС и аэродинамические характеристики вентиляторной ступени, что позволяет целенаправленно управлять приоритетами при назначении допусков и контроле качества.

3. Разработана комплексная методика геометрической параметризации РЛВ, основанная на использовании аналитических зависимостей и топологических связей между элементами модели.

4. 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.

5. Обоснована целесообразность применения линеаризованных моделей отклика для оценки чувствительности ключевых интегральных показателей эффективности к единичным производственным отклонениям. Полученные аппроксимированные зависимости обеспечивают значительное снижение вычислительных затрат и пригодны для интеграции в алгоритмы многокритериальной оптимизации и вероятностного анализа надежности.

6. Сформулированы рекомендации по внедрению разработанной методики в инженерную практику проектирования и производства лопаточных аппаратов повышенной сложности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная методика многодисциплинарного анализа чувствительности геометрических параметров РЛВ авиационных ГТД, позволяющая системно оценивать влияние технологической дисперсии на прочностные и аэродинамические характеристики.

2. Ранжированный перечень ключевых геометрических параметров, оказывающих определяющее влияние на НДС, аэродинамическую эффективность и устойчивость вентиляторной ступени.

3. Модели производственных отклонений, основанные на статистической обработке реальных данных измерений геометрических параметров серийных партий лопаток.

4. Линеаризованные модели чувствительности для оперативной оценки влияния единичных производственных отклонений на интегральные показатели эффективности вентиляторной ступени.

5. Рекомендации по внедрению разработанной методики в инженерную практику проектирования и производства лопаточных аппаратов, ориентированные на повышение конструктивной надежности, энергоэффективности и технологичности.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении прикладной методики, ориентированной на повышение эффективности, надежности и

технологичности проектирования РЛВ авиационных ГТД. Предложенная методика многодисциплинарного анализа чувствительности может быть непосредственно использована в инженерной практике предприятий авиационного двигателестроения для оптимизации проектных решений с учетом реальных производственных отклонений.

Достоверность полученных результатов определяется 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. Использование геометрии «горячей» формы с учетом эксплуатационных деформаций, а также сопоставление с базовыми расчетными и экспериментальными данными дополнительно подтверждают корректность и надежность полученных результатов.

Реализация в промышленности. Разработанные подходы применяются на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» при проектировании РЛВ для перспективных двигателей SaM146 и ПД-8, устанавливаемых на ближнемагистральные пассажирские самолеты.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались: на международной молодежной конференции «XLIV Гагаринские чтения» (МАИ, г. Москва, 2018); на XXI, XXII и XXIII международных конференциях «Авиация и космонавтика» (МАИ, г. Москва, 2022-2024); на международной научно-практической конференции им. Н.Д.Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самарский университет, г. Самара, 2023, 2025); а также на семинаре «Динамика и прочность авиационных двигателей» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И.Баранова», г. Москва, 2026).

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертационного исследования получены автором лично и составляют его индивидуальный вклад в развитие методов многодисциплинарного анализа чувствительности лопаточных машин авиационных ГТД.

Автором самостоятельно выполнены следующие ключевые этапы исследования:

1. Проведен системный анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии РЛВ с учетом требований к энергоэффективности, надежности и устойчивости к технологическим неопределенностям.

2. Разработана интегрированная модель многодисциплинарного анализа чувствительности, объединяющая аэродинамическое и прочностное моделирование, параметрический анализ и статистическое описание производственных отклонений.

3. Реализованы численные алгоритмы и расчетные процедуры анализа чувствительности с применением современных программных комплексов.

4. Разработаны практические рекомендации по внедрению предложенной методики в инженерную практику проектирования и производства лопаточных аппаратов повышенной сложности.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 18 научных работ, из них 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 3 статьи в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus, 1 статья в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Web of Science, 7 тезисов доклада конференций и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Объем работы. Структура диссертации включает введение, 5 глав, заключение, список литературы и 4 приложения. Общий объем работы составляет 194 страницы, иллюстрированных 151 рисунком. Библиографический список насчитывает 123 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, связанная с необходимостью импортозамещения и повышения энергоэффективности авиационных ГТД в условиях санкционных ограничений. Сформулированы цель и задачи, направленные на разработку методики многодисциплинарного анализа чувствительности РЛВ к технологическим отклонениям. Показаны научная новизна, состоящая в системном учете вероятностных характеристик производственной дисперсии при оценке НДС и аэродинамических параметров. Приведены сведения о структуре диссертации, объекте исследования, апробации и публикационной активности автора.

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 многодисциплинарному подходу с учетом технологической дисперсии. По результатам выполненного анализа разработана общая методика исследования, реализованная в виде замкнутого вычислительного цикла (см. Рисунок 1). Цикл инициируется прецизионными измерениями геометрии РЛВ на КИМ, по данным которых создаются параметрические «холодные» модели. Для них проводится серия прочностных расчетов, а полученные деформации от центробежных и температурных

воздействий используются для реконструкции «горячей» геометрии. Далее следует завершающая серия аэродинамических расчетов, после чего цикл замыкается анализом чувствительности и проверкой функциональных зависимостей.



Рисунок 1 – Структурная схема методики исследования

Во второй главе представлена методика контрольно-измерительных мероприятий РЛВ с использованием КИМ, включающая алгоритмы сканирования, припасовки измеренных данных к номинальной CAD-модели и разделения погрешностей положения и формы. На основе статистического анализа выборок измерений серийных РЛВ установлены законы распределения ключевых геометрических параметров и оценены их корреляционные связи, что позволило обосновать рациональный набор управляемых переменных. В качестве управляемых переменных в данной работе приняты: смещения центра тяжести (T_x и T_y), угол установки (Θ), максимальная толщина (E), а также толщины у входной и выходной кромок (e_1 и e_2) (см. Рисунок 2,а). Указанные параметры варьируются в характерных сечениях по высоте лопатки: 45%, 75%, 90% (см. Рисунок 2,б).

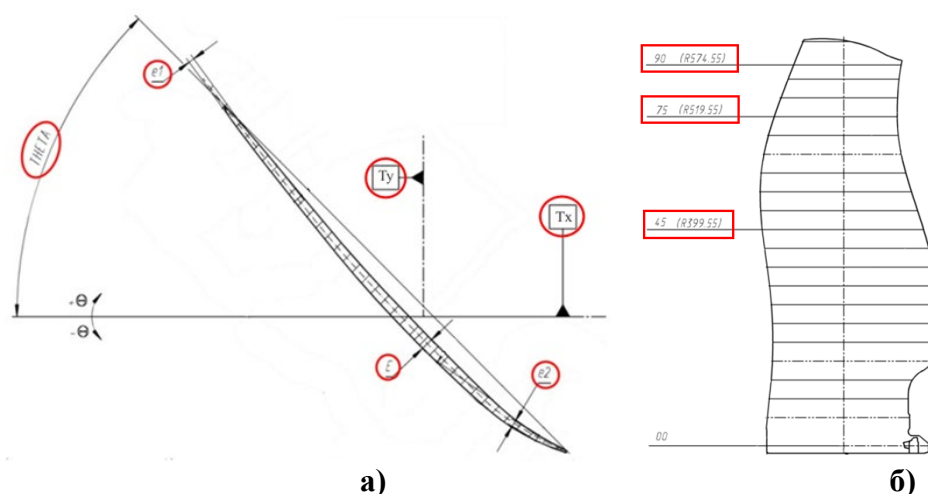


Рисунок 2 – Геометрические параметры, используемые в работе (а – управляемые переменные; б – контрольные сечения лопатки)

Выбранный набор параметров обеспечивает оптимальный баланс между точностью описания реальной геометрии и вычислительной эффективностью последующих расчетных исследований.

В третьей главе представлена комплексная методика геометрической параметризации РЛВ, а также специализированные программные инструменты для автоматизированного построения их твердотельных моделей. В среде САД-системы Siemens NX разработан программный комплекс «BladeToolMAI», обеспечивающий реконструкцию параметрических моделей РЛВ «холодной» формы по данным КИМ с учетом реальных технологических отклонений профиля

Предложен и реализован программный модуль «FindSweepLayers» в среде САЕ-системы ANSYS Workbench, позволяющий автоматически извлекать координаты деформированных узлов из результатов прочностного расчета и формировать параметрические модели РЛВ «горячей» формы, учитывающие влияние центробежных и температурных нагрузок.

Сформирована база из 37 параметризованных моделей (включая номинальную геометрию), соответствующих предельным значениям геометрических допусков в характерных поперечных сечениях. Для каждого параметра величины допусков дифференцированы по номерам сечений. База включает 18 пар моделей (min/max), каждая из которых имитирует нижнее и верхнее граничные отклонения одного из параметров (см. Таблица 1).

Таблица 1 – Перечень исследуемых моделей РЛВ

Имя лопатки	Номер сечения	Изменяемый параметр
1 min / 1 max	45	$T_x \pm 0,4$
2 min / 2 max	75	$T_x \pm 0,5$
3 min / 3 max	90	$T_x \pm 1,0$
4 min / 4 max	45	$T_y \pm 0,4$
5 min / 5 max	75	$T_y \pm 0,5$
6 min / 6 max	90	$T_y \pm 1,0$
7 min / 7 max	45	$\Theta \pm 0,55^\circ$
8 min / 8 max	75	$\Theta \pm 0,55^\circ$
9 min / 9 max	90	$\Theta \pm 0,55^\circ$
10 min / 10 max	45	$E \pm 0,25$
11 min / 11 max	75	$E \pm 0,25$
12 min / 12 max	90	$E \pm 0,25$
13 min / 13 max	45	$e1 \pm 0,1$
14 min / 14 max	75	$e1 \pm 0,1$
15 min / 15 max	90	$e1 \pm 0,1$
16 min / 16 max	45	$e2 \pm 0,3$
17 min / 17 max	75	$e2 \pm 0,3$
18 min / 18 max	90	$e2 \pm 0,3$

В четвертой главе на основе серии статических прочностных расчетов 37 параметрических моделей РЛВ «холодной» формы выполнена количественная оценка влияния технологического разброса геометрии на НДС. Анализ охватывает радиальные (δ_x), окружные (δ_y), осевые (δ_z) и суммарные перемещения лопатки (δ_Σ); напряжения в пере лопатки ($\sigma_{\text{перо}}$), а также в зонах скруглений ($\sigma_{\text{скруг}}$). Результаты обобщены в таблице 2, где приведены коэффициенты чувствительности, рассчитанные как относительные отклонения

исследуемых характеристик от номинальных значений базовой геометрии. Все данные выражены в процентах, что обеспечивает сопоставимость вклада различных геометрических параметров. Для визуальной интерпретации максимальные отклонения выделены красным, минимальные – синим цветом.

Таблица 2 – Коэффициенты влияния варьируемых геометрических переменных на НДС (в % от номинала)

Модель	Максимальные перемещения (по модулю)				$\sigma_{\text{перо}}$	$\sigma_{\text{скруг}}$
	δ_x	δ_y	δ_z	δ_{Σ}		
1 C min	0,64	1,60	1,69	1,68	-0,57	0,00
2 C min	1,27	-1,80	-0,92	-1,20	-0,28	-0,21
3 C min	-7,01	-10,62	-10,12	-10,30	-1,13	0,00
4 C min	0,64	2,40	2,61	2,28	-2,27	0,21
5 C min	0,64	-2,40	-0,61	-1,32	0,57	0,21
6 C min	-3,18	-9,62	-7,36	-8,50	-1,42	0,21
7 C min	0,00	-0,40	-0,92	-0,12	-1,70	0,21
8 C min	0,64	3,41	2,30	2,40	-2,83	0,41
9 C min	1,27	-2,81	-1,07	0,60	-1,13	0,21
10 C min	0,64	-0,60	-0,46	0,72	-0,85	-0,41
11 C min	0,00	-0,60	-0,31	0,48	-1,98	-0,41
12 C min	1,27	4,41	-0,92	-2,28	0,00	-0,21
13 C min	0,00	-1,40	0,00	0,60	-2,26	0,21
14 C min	0,00	-1,20	0,00	0,60	-2,26	0,00
15 C min	-0,64	-2,40	1,07	1,68	0,85	0,00
16 C min	0,64	5,21	0,61	1,32	0,57	-1,24
17 C min	1,27	6,01	0,00	2,75	0,57	-1,03
18 C min	1,27	6,01	1,23	3,23	0,85	-0,41
1 C max	-0,64	-1,60	-1,69	-1,68	0,52	0,03
2 C max	-1,27	1,80	0,92	1,20	0,32	0,21
3 C max	7,01	10,62	10,12	10,30	1,58	-0,05
4 C max	-0,64	-2,00	-2,61	-2,28	2,77	-0,27
5 C max	-0,64	2,40	0,61	1,32	-0,51	-0,28
6 C max	4,46	10,02	7,67	8,50	1,41	-0,28
7 C max	0,00	-1,20	0,92	0,12	1,85	-0,25
8 C max	-0,64	-3,01	-2,30	-2,40	3,35	-0,45
9 C max	-1,27	3,21	1,07	1,80	1,02	-0,28
10 C max	-0,64	-1,00	-0,46	-0,72	1,00	0,70
11 C max	0,00	-1,00	-0,31	-0,48	1,97	0,81
12 C max	-1,27	-4,01	-0,92	-2,04	0,05	0,48
13 C max	0,00	1,80	0,00	0,60	2,19	-0,22
14 C max	0,00	1,60	0,00	0,60	2,37	-0,14
15 C max	0,64	2,81	1,07	1,68	-0,70	-0,13
16 C max	-0,64	-4,81	0,61	-1,32	-0,50	1,15
17 C max	-1,27	-5,61	0,00	-2,04	-0,68	0,91
18 C max	-1,27	-5,61	-1,23	-2,75	-0,90	0,40

В ходе анализа чувствительности установлены следующие закономерности:

1. Наибольшие изменения перемещений зафиксированы при вариации смещения центра тяжести по оси X (T_x) в 90-м сечении, причем коэффициент влияния на окружные перемещения достигает 10,62%. Варьирование толщины профиля у выходной кромки (e_2) также вносит значимый вклад. Ее увеличение приводит к монотонному снижению всех компонентов перемещений, что интерпретируется как повышение изгибной жесткости пера, а уменьшение – к их росту. Максимальный диапазон изменения окружных перемещений при варьировании e_2 составляет от -5,61% до +6,01%.

2. Выявлена дифференцированная чувствительность прочностных характеристик к различным типам геометрических отклонений. Наиболее значимое влияние на уровень максимальных эквивалентных напряжений в пере лопатки оказывает изменение угла установки (Θ) в 75-м сечении, где увеличение параметра вызывает рост напряжений на 3,35%, а уменьшение – снижение на 2,27%. В противоположность этому, напряженное состояние в зонах концентрации (скругления профиля у замка) характеризуется слабой чувствительностью к вариациям геометрии: максимальные изменения напряжений здесь не превышают $\pm 1,24\%$.

3. Установлено, что связь между геометрическими параметрами и прочностными характеристиками носит различный характер. Для параметров, определяющих распределение массы и геометрию хвостовой части (T_x , T_y , e_2), зависимость отклика системы может быть с достаточной точностью описана линейными моделями чувствительности (см. Рисунок 3,а). В то же время варьирование угла установки (Θ), максимальной толщины профиля (E) и толщины входной кромки (e_1) демонстрирует существенно нелинейное поведение, обусловленное сложным перераспределением аэродинамических и инерционных нагрузок (см. Рисунок 3,б).

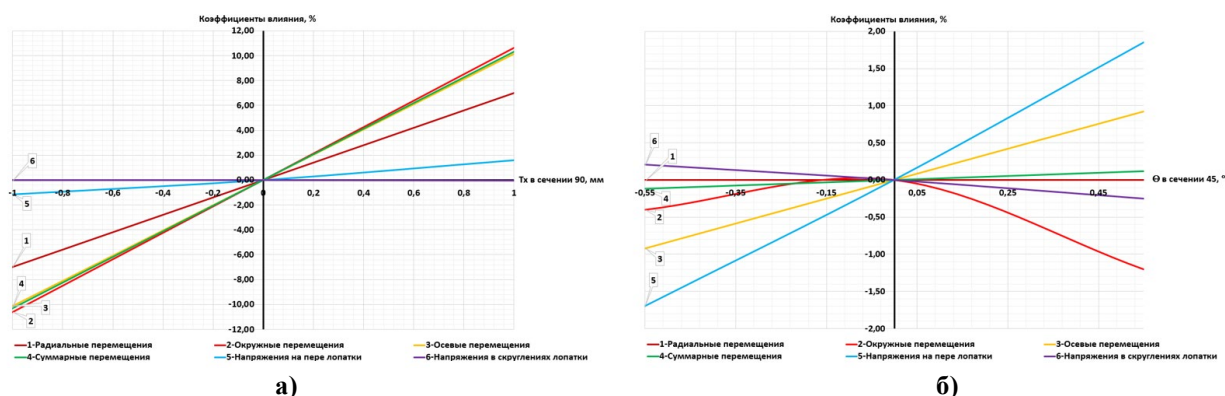


Рисунок 3 – Графические зависимости влияния варьируемых геометрических переменных на НДС РЛВ
(а – зависимости для моделей 3_C_min и 3_C_max ($T_x-1,0 / T_x+1,0$ в сечении 90%);
б – зависимости для моделей 7_C_min и 7_C_max ($\Theta-0,55^\circ / \Theta+0,55^\circ$ в сечении 45%))

Полученные деформированные конфигурации РЛВ в «холодном» состоянии использованы для формирования «горячей» геометрии, необходимой для последующих аэродинамических расчетов.

В пятой главе выполнена количественная оценка влияния технологического разброса геометрии РЛВ на их аэродинамические характеристики. Исследование базируется на серии газодинамических расчетов 37 параметрических моделей лопаток в «горячем» состоянии, сформированных с учетом термомеханических деформаций под действием эксплуатационных нагрузок.

Анализ охватывает ключевые интегральные характеристики ступени: массовый расход воздуха (G_B), степень повышения полного давления (π_k^*), КПД (η_k^*) и тяга (P).

Полученные значения обобщены в таблице 3, в которой представлены коэффициенты чувствительности этих характеристик к изменению геометрии. Расчет коэффициентов выполнен по методике, унифицированной с подходом, принятым в прочностных расчетах.

Таблица 3 – Коэффициенты влияния варьируемых геометрических переменных на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Модель	Gв	π_k^*	η_k^*	P
1 Н min	1,03	-0,55	0,15	-0,92
2 Н min	0,74	-0,60	0,02	-1,19
3 Н min	0,99	-0,61	0,16	-1,07
4 Н min	1,05	-0,55	0,16	-1,21
5 Н min	0,95	-0,59	0,14	-1,24
6 Н min	1,01	-0,62	0,20	-1,27
7 Н min	0,82	-0,37	0,23	0,91
8 Н min	0,29	-0,71	0,22	-1,52
9 Н min	0,23	-0,63	0,11	-1,54
10 Н min	1,06	-0,53	0,14	-0,96
11 Н min	1,06	-0,55	0,15	-1,03
12 Н min	1,09	-0,56	0,17	-0,93
13 Н min	1,01	-0,56	0,16	-1,03
14 Н min	1,02	-0,57	0,16	-1,07
15 Н min	1,02	-0,59	0,19	-1,11
16 Н min	1,03	-0,56	0,16	-1,02
17 Н min	1,06	-0,59	0,19	-1,10
18 Н min	1,08	-0,58	0,19	-1,03
1 Н max	-1,03	0,55	-0,15	0,91
2 Н max	-0,74	0,60	-0,02	1,18
3 Н max	-0,99	0,61	-0,16	1,15
4 Н max	-1,05	0,55	-0,16	1,21
5 Н max	-0,95	0,59	-0,14	1,24
6 Н max	-1,01	0,61	-0,20	1,26
7 Н max	-0,82	0,37	-0,23	-0,91
8 Н max	-0,29	0,71	-0,22	1,52
9 Н max	-0,23	0,63	-0,11	1,54
10 Н max	-1,06	0,53	-0,14	0,95
11 Н max	-1,06	0,55	-0,15	1,03
12 Н max	-1,09	0,56	-0,17	0,93
13 Н max	-1,01	0,56	-0,16	1,02
14 Н max	-1,02	0,57	-0,16	1,06
15 Н max	-1,02	0,59	-0,18	1,10
16 Н max	-1,03	0,56	-0,16	1,02
17 Н max	-1,06	0,59	-0,18	1,10
18 Н max	-1,08	0,57	-0,18	1,03

В ходе анализа чувствительности установлены следующие закономерности:

1. Доминирующее влияние на изменение массового расхода воздуха оказывает варьирование максимальной толщины профиля (E) в 90-м сечении по высоте лопатки. Коэффициент влияния данного параметра достигает 1,09%. Выявлена обратная пропорциональная зависимость: уменьшение максимальной толщины на заданную величину приводит к снижению аэродинамического сопротивления межлопаточного канала, ослаблению блокирующего эффекта и, как следствие, к возрастанию массового расхода. Напротив, увеличение толщины на ту же величину сопровождается усилением блокировки потока, более ранним развитием пограничного слоя, что ограничивает расход.

2. Выявлена выраженная и практически симметричная зависимость степени повышения давления от изменения угла установки (Θ) в 75-м сечении по высоте лопатки. Коэффициент влияния составляет $\pm 0,71\%$, уменьшение угла на заданную величину приводит к снижению степени сжатия относительно номинального значения, тогда как увеличение на ту же величину – к росту.

3. Установлено, что варьирование угла установки (Θ) в 45-м сечении по высоте лопатки изменяет КПД ступени в пределах $\pm 0,23\%$ относительно номинального значения. Характер зависимости является неоднозначным: увеличение угла установки при оптимальном обтекании способствует снижению относительных потерь и росту КПД, однако чрезмерное отклонение угла атаки от расчетного в любую сторону вызывает локальные отрывы пограничного слоя, рост трения и вихревых потерь, что снижает аэродинамическую эффективность.

4. С учетом того, что вентилятор КНД формирует значительную долю суммарной тяги ГТД, особый интерес представляет анализ чувствительности интегрального тягового параметра. Наибольшее влияние на изменение удельной тяги оказывает варьирование угла установки (Θ) в 90-м сечении по высоте лопатки. Коэффициент влияния достигает $1,54\%$, что является максимальным значением среди всех рассмотренных аэродинамических параметров. Выявлена прямая пропорциональная зависимость: изменение угла установки на заданную величину в одну сторону снижает тягу, а в противоположную – повышает на соответствующий процент.

5. Установлено, что связь между всеми рассмотренными геометрическими параметрами и аэродинамическими характеристиками в пределах технологических допусков, может быть, с достаточной точностью описана линейными моделями чувствительности (см. Рисунок 4).

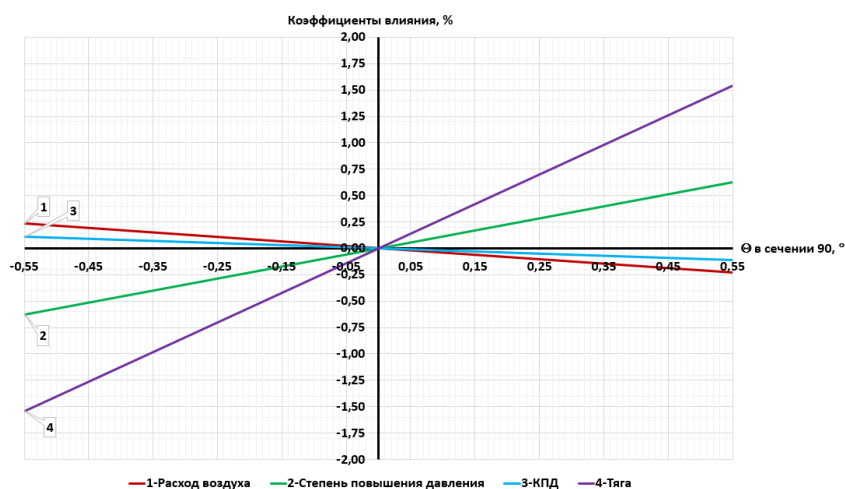


Рисунок 4 – Графические зависимости варьируемых геометрических переменных на аэродинамические характеристики лопатки (зависимости для моделей 9_H_min и 9_H_max ($\Theta - 0,55^\circ / \Theta + 0,55^\circ$ в сечении 90%))

Полученные коэффициенты чувствительности и выявленные закономерности формируют основу для вероятностного анализа эффективности вентиляторной ступени.

Исследование РЛВ с комбинированными геометрическими отклонениями. Для оценки совместного влияния геометрических отклонений на аэродинамику ступени разработаны четыре параметризованные 3D-модели РЛВ. В них исследуемые параметры варьируются по граничным значениям (максимум/минимум), а также в двух комбинированных наборах, моделирующих увеличение и уменьшение проходных сечений. Полученные коэффициенты чувствительности основных аэродинамических характеристик ступени обобщены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты влияния комбинированных геометрических отклонений на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Модель	Описание модели	Gв	π_k^*	η_k^*	P
1	Все отклонения в минимальную сторону	0,58	1,05	-0,10	3,24
2	Все отклонения в максимальную сторону	-0,49	0,81	-0,47	0,67
3	Для сечений 04-25 отклонения параметров: T_x, T_y, E, e_1, e_2 принимаются в максимальную сторону, а для сечений 30-95 – в минимальную. Отклонение θ для всех сечений принимается максимальным	0,46	0,87	-0,02	2,53
4	Для сечений 04-25 отклонения всех параметров принимаются в максимальную сторону. Для сечений 30-95 отклонения параметров: E, e_1, e_2, θ – в минимальную сторону, отклонения T_x, T_y – в максимальную	0,69	1,02	0,03	3,13

В ходе анализа чувствительности установлены следующие закономерности:

1. Наиболее существенной реакцией на комбинированные отклонения является изменение тяги, разброс которой составляет от +0,67% до +3,24%. Важно отметить, что все исследованные комбинации предельных отклонений приводят к изменению тяги относительно номинала, что свидетельствует о возможности деградации тяговых характеристик при неблагоприятном сочетании технологических допусков.

2. Изменения расхода воздуха и степени повышения давления носят согласованный характер. Модели с увеличенным расходом (1, 3, 4) демонстрируют более высокий прирост тяги. Модель 2, характеризующаяся снижением расхода (-0,49%), показывает наименьший прирост тяги и наибольшее снижение КПД.

Исследование РЛВ в двухканальной постановке. Для учета эффектов межлопаточного взаимодействия в условиях нарушенной периодичности геометрии была использована модель сектора проточной части, содержащая две соседние РЛВ, геометрия которых учитывает предельные комбинации отклонений профильных параметров, признанные на предыдущем этапе наиболее критическими. Расчеты выполнялись для следующих сценариев (см. Таблица 5):

1. Максимальное проходное сечение: комбинация лопаток, соответствующих «Модель 3 – Модель 4» (выбрана по результатам одноканальных расчетов как обеспечивающая наибольшую эффективную площадь).

2. Минимальное проходное сечение: комбинация моделей «Модель 4 – Модель 3» в обратном порядке, формирующая наименьшую площадь среди исследуемых вариантов.

Таблица 5 – Коэффициенты влияния комбинированных геометрических отклонений на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Комбинация	$G\epsilon$	π_k^*	η_k^*	P
Модель 3 – Модель 4	0,46	0,86	-0,02	2,53
Модель 4 – Модель 3	-0,17	-0,38	-0,70	-0,39

В ходе анализа чувствительности установлены следующие закономерности:

1. Влияние комбинации «Модель 3 – Модель 4» (максимальное проходное сечение): данная комбинация сопровождается ростом массового расхода (+0,46%) и степени повышения давления (+0,87%), что обеспечивает прирост тяги на +2,53% при практически неизменном КПД (снижение всего 0,02%).

2. Влияние комбинации «Модель 4 – Модель 3» (минимальное проходное сечение): напротив, данная комбинация приводит к снижению расхода и давления, падению КПД на 0,70% и снижению тяги на –0,39%.

Использование двухканальной модели, в отличие от классической одноканальной с идеализированными периодическими граничными условиями, позволяет корректно оценить влияние неоднородности геометрии. Выявленная разница в характеристиках между комбинациями подтверждает наличие значимых эффектов межлопаточного взаимодействия. Традиционный одноканальный подход усреднил бы эти эффекты, связанные с конкретным порядком установки РЛВ в венце.

Адаптивная сборка вентиляторной ступени. Разработанный вычислительный аппарат и полученные количественные оценки чувствительности формируют научную основу для перехода от пассивного контроля допусков к адаптивным стратегиям сборки лопаточных венцов. В отличие от традиционного подхода, при котором лопатки рассматриваются как взаимозаменяемые в пределах балансировочной группы, предлагаемая методология трактует аэродинамическую неоднородность не как неустранимый дефект, а как управляемый ресурс. Это позволяет без дополнительных производственных затрат целенаправленно повышать или стабилизировать выходные характеристики вентиляторной ступени за счет рационального взаимного расположения РЛВ с известными геометрическими отклонениями.

Реализация адаптивной сборки вентиляторной ступени дает прирост тяги на 1,5% при увеличении суммарного статического момента на 33%, что не выходит за эксплуатационные ограничения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эксплуатационной эффективности и конструктивной надежности РЛВ авиационных ГТД. Это достигнуто за счет разработки и внедрения комплексной методики многодисциплинарного анализа чувствительности, позволяющей установить количественные и качественные закономерности влияния ключевых геометрических параметров формы лопаток на их прочностные и аэродинамические характеристики с учетом реальных производственных отклонений.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана и апробирована на реальных серийных данных методика прецизионного контроля и параметризации пера РЛВ. Статистически обоснован и ранжирован перечень ключевых геометрических параметров, оказывающих определяющее влияние на эксплуатационные характеристики.

2. Создан комплекс специализированных программных инструментов для автоматизированной реконструкции параметрических моделей РЛВ с учетом реальных технологических отклонений («холодная» геометрия) и эксплуатационных деформаций («горячая» геометрия). Это позволило сформировать представительную базу параметризованных моделей, описывающих граничные значения полей допусков.

3. Выполнен анализ чувствительности НДС. Установлено, что максимальные перемещения пера в первую очередь определяются отклонениями смещения центра тяжести в периферийной зоне, тогда как уровень напряжений наиболее чувствителен к вариациям угла установки в средней по высоте части. Выявлен принципиально различный характер зависимостей: для параметров, определяющих распределение массы, отклик системы линеен, а для угла установки и толщин – носит существенно нелинейный характер.

4. Количественно оценено влияние технологической дисперсии на аэродинамическую эффективность. Доказана возможность линеаризации зависимостей интегральных аэродинамических характеристик от геометрических отклонений в пределах производственных допусков. Определено, что доминирующее влияние на массовый расход оказывает максимальная толщина профиля, на степень повышения давления – угол установки в средних сечениях, а критическим параметром с точки зрения стабильности тяги является угол установки в периферийном сечении.

5. В результате анализа комбинированных отклонений с применением двухканальной модели сектора проточной части выявлены значимые эффекты межлопаточного взаимодействия, не фиксируемые классическими одноканальными подходами.

6. Обоснована и подтверждена целесообразность применения линеаризованных моделей чувствительности для оперативной оценки влияния производственных отклонений. Полученные модели формируют научную основу для вероятностного анализа разброса эксплуатационных характеристик серийных двигателей, целенаправленного назначения допусков и оптимизации технологических процессов.

7. Разработанная методика и научные положения внедрены в инженерную практику ПАО «ОДК-Сатурн» при проектировании РЛВ перспективных двигателей SaM146 и ПД-8, что подтверждает практическую значимость работы для отечественного авиационного двигателестроения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Архипов, А.Н. и др. Автоматизированное построение модели рабочей лопатки вентилятора по данным измерений профиля в CAD-системе / Бугряшова Е.В., Равикович Ю.А., Савин Р.А., Терентьев В.В., **Шевяков А.О.** // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 4. – С. 7-17.

2. Архипов, А.Н. и др. Автоматизированное построение параметрической модели рабочей лопатки вентилятора / Кретинин Г.В., Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 4(86). – С. 65-73.

3. Архипов, А.Н. и др. Повышение точности численного моделирования вентиляторной ступени за счет учета производственных отклонений лопаток / Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – № 3. – С. 93-99.

4. Архипов, А.Н. и др. Проверка функциональной зависимости между производственными отклонениями геометрии пера лопатки и показателями эффективности вентиляторной ступени / Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2024. – № 3. – С. 106-114.

5. Архипов, А.Н. и др. Интеграция результатов контрольно-измерительных мероприятий пера лопатки в расчетное исследование рабочего процесса вентиляторной ступени / Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2024. – № 4. – С. 86-94.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

6. Arkhipov, A.N. et al. Improving the Accuracy of Numerical Simulation of the Fan Stage Taking into Account the Production Deviations of Blades / Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., **Shevyakov A.O.** // Russian Aeronautics. – 2023. – Vol. 66, No. 3. – P. 520-527.

7. Arkhipov, A.N. et al. Verification of the Functional Relation between Manufacturing Deviations of Blade Airfoil Geometry and Fan Stage Efficiency Indicators / Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., **Shevyakov A.O.** // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 3. – P. 584-593.

8. Arkhipov, A.N. et al. Integration of the Results of the Control and Measurement of Blade Airfoil into the Computational Study of the Fan Stage Workflow / Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., **Shevyakov A.O.** // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 4. – P. 828-836.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Web of Science

9. Arkhipov, A.N. et al. Analysis of the Geometric Deviation Influence on the Aerodynamic Characteristics of the Fan Blades / Bugryashova E.V., Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., **Shevyakov A.O.** // Amazonia Investiga. 2019. Vol. 8. № 22. P. 443-452.

Публикации в других изданиях

10. **Шевяков, А.О.** Автоматизация процесса построения измеренной и параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора по данным КИМ // Гагаринские чтения – 2018: Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции, Москва-Ахтубинск-Байконур, 17-20 апреля 2018 года. Том 1. – Москва-Ахтубинск-Байконур: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 146-147.

11. Равикович, Ю.А. и др. Разработка методики многодисциплинарной оптимизации рабочих лопаток вентилятора газотурбинного двигателя / Архипов А.Н., **Шевяков А.О.** // Авиация и космонавтика: тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство «Перо», 2022. – С. 179-181.

12. Архипов, А.Н. и др. Опыт оптимизации геометрии пера рабочих лопаток вентилятора / Равикович Ю.А., **Шевяков А.О.** // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21-23 июня 2023 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Том 1. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 115-116.

13. Равикович, Ю.А. и др. Определение функциональной зависимости между производственными отклонениями пера лопатки и показателями эффективности ступени вентилятора / Архипов А.Н., **Шевяков А.О.** // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой

Международной конференции, Москва, 20-24 ноября 2023 года. – Москва: ООО «Издательство «Перо», 2023. – С. 111-112.

14. Равикович, Ю.А. и др. Технология определения оптимальных схем сборки вентиляторной ступени авиационного двигателя с учетом статических моментов и геометрических отклонений лопаток / Архипов А.Н., **Шевяков А.О.** // Авиация и космонавтика: Тезисы 23-ей Международной конференции, Москва, 18-22 ноября 2024 года. – Москва: ООО «Издательство «Перо», 2024. – С. 98-99.

15. Равикович, Ю.А. и др. Разработка мероприятий по совершенствованию процедуры сборки вентиляторной ступени авиационного турбовентиляторного двигателя / Архипов А.Н., **Шевяков А.О.** // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 18-20 июня 2025 года. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 2025. – С. 913-914.

16. Равикович, Ю.А. и др. Анализ чувствительности лопаток вентилятора к производственным отклонениям // Архипов А.Н., Холобцев Д.П., Шахов А.С., **Шевяков А.О.** // Динамика и прочность авиационных двигателей: семинар, посвященный 100-летию со дня рождения профессора Бориса Фёдоровича Шорра: сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – М.: ЦИАМ, 2026. – 171 с.: ил. ISBN 978-5-94049-063-0.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

17. Архипов, А.Н. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665345 Российская Федерация. Программа автоматизации процесса построения лопатки вентилятора с использованием САД-системы NX по данным КИМ. Равикович Ю.А., Матушкин А.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // № 2018663214. заявл.: 22.11.2018. опубли.: 04.12.2018.

18. Архипов, А.Н. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666141 Российская Федерация. Программа автоматизации процесса построения параметрической модели рабочей лопатки вентилятора с использованием САД-системы NX по данным КИМ. / Равикович Ю.А., Матушкин А.А., Холобцев Д.П., **Шевяков А.О.** // № 2019665192. заявл.: 26.11.2019. опубли.: 05.12.2019.