


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)

 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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Равикович Юрий Александрович

Москва – 2026

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	26
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРОФИЛЯ ПЕРА ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА .....	28
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	69
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА.....	71
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	96
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СТУПЕНИ К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОТКЛОНЕНИЯМ ЛОПАТОК....	98
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	116
ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СТУПЕНИ К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОТКЛОНЕНИЯМ ЛОПАТОК..	119
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	158
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное).....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное).....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) .....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное).....	185

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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.

Вместе с тем сложившаяся ситуация способствовала активизации мер по обеспечению технологической независимости. При непосредственном участии государства были запущены и последовательно реализуются программы импортозамещения, охватывающие ключевые направления авиастроения [1]. Особое внимание уделено разработке и освоению отечественных двигателей, включая перспективные проекты ПД-35, ПД-14, ПД-8 и ТВ7-117СТ-01, что рассматривается как важнейший шаг на пути к восстановлению стратегической самостоятельности отрасли.

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

Одной из наиболее ответственных деталей вентиляторной ступени является рабочая лопатка ротора, 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 многодисциплинарную оптимизацию их геометрических характеристик.

С развитием технологий авиационного двигателестроения предъявляются все более жесткие требования к рабочим лопаткам: 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 лопатки, оказывающие влияние на эффективность даже в пределах заданных допусков.

Решение поставленной задачи возможно на основе применения многодисциплинарного анализа чувствительности показателей эффективности рабочих лопаток вентиляторной ступени

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, долговечность 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. Люльки», 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. Крестина, К.С. Федечкина, М.Е. Колотникова, В.И. Милешина, А.Б. Агульника. Важные результаты в этой области также получены зарубежными учеными, в частности Чарльзом Хиршем и Н. Кампсти.

Несмотря на активную научную деятельность и обширную базу исследований, посвященных совершенствованию отдельных элементов компрессоров низкого давления, 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.

Проведенный анализ чувствительности показателей эффективности вентиляторной ступени газотурбинного двигателя к производственным отклонениям лопаток показал возможные направления работы и позволил сформулировать цель, направления, задачи исследования и методы их решения.

**Объектом исследования** выступают рабочие лопатки вентиляторной ступени компрессора низкого давления авиационного газотурбинного двигателя, 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, повышения точности проводимых расчетов и их автоматизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии рабочих лопаток вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей, с учетом требований к энергоэффективности, прочности, технологичности и устойчивости к различным факторам неопределенности.

2. Идентификация ключевых геометрических параметров рабочих лопаток, 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 рабочих лопаток вентилятора для оценки влияния ключевых геометрических параметров их профиля на напряженно-деформированное состояние 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 в рамках программ импортозамещения и технологического развития отечественной авиационной промышленности.

#### **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 рабочих лопаток вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей с учетом комплексных требований к энергоэффективности, прочностной надежности, технологичности и устойчивости к факторам неопределенности, включая производственные отклонения и эксплуатационные воздействия. В отличие от традиционных методик, предложенный анализ учитывает междисциплинарную природу задачи.

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

3. Разработана комплексная методика геометрической параметризации рабочих лопаток вентилятора, основанная на использовании аналитических зависимостей и топологических связей между элементами модели. Создан специализированный программный комплекс «BladeToolMAI», реализованный в среде CAD-системы Siemens NX, который обеспечивает автоматизированное построение твердотельных 3D-моделей лопаток по данным координатно-измерительных мероприятий.

4. Предложена и реализована методика междисциплинарного анализа чувствительности, позволяющая установить количественные и качественные закономерности влияния геометрических параметров лопаток на их напряженно-деформированное состояние 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 рабочих лопаток вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей, позволяющая системно оценивать влияние технологической дисперсии на прочностные и аэродинамические характеристики конструкции.

2. Ранжированный перечень ключевых геометрических параметров, оказывающих определяющее влияние на напряженно-деформированное состояние, 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 двигателя.

5. Аппроксимированные зависимости отклика, учитывающие совместное воздействие комплексных геометрических отклонений. В отличие от локальных линейных моделей, данные зависимости обеспечивают высокую точность прогнозирования параметров двигателя при вариации множественных факторов в пределах допустимых полей рассеяния.

6. 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 рабочих лопаток вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей. 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. Применение откалиброванных моделей турбулентности, 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.** На предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» разработанные программы автоматизации построения параметрических и измеренных 3D-моделей лопаток вентилятора, реализованные в CAD-системе Siemens NX на основе данных координатно-измерительной машины, были применены в процессе модернизации компрессора низкого давления двигателя регионального самолета.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных конференциях, в том числе: на XLIV международной молодежной научной конференции «XLIV Гагаринские чтения» (МАИ, г. Москва, 2018 г.); на 21-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (МАИ, г. Москва, 2022 г.), международной научно-практической конференции им. Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самарский университет, г. Самара, 2023 г.); на 22-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (МАИ, г. Москва, 2023 г.); на 23-ей международной конференции «Авиация и космонавтика» (МАИ, г. Москва, 2024 г.); на международной научно-практической конференции им. Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самарский университет, г. Самара, 2025 г.); на семинаре «Динамика и прочность авиационных двигателей», посвященном 100-летию со дня рождения профессора Бориса Федоровича Шорра (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, 2026 г.).

**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 газотурбинных двигателей. Научная значимость и достоверность полученных результатов подтверждены публикациями в рецензируемых научных журналах, включенных в системы цитирования ВАК, Web of Science и Scopus.

Автором самостоятельно выполнены следующие ключевые этапы исследования:

1. Проведен системный анализ современных подходов к проектированию и оптимизации геометрии рабочих лопаток вентилятора 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 ANSYS Workbench и NUMECA Fine/Turbo.

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, пять глав, заключение, список литературы и четыре приложения. Общий объем работы составляет 194 страницы, иллюстрированных 151 рисунком. Библиографический список насчитывает 123 наименования.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Современное состояние проблемы

Современный этап развития вычислительной техники и численных методов создал предпосылки для существенного совершенствования подходов к аэродинамическому анализу и проектированию вентиляторных ступеней. Наиболее значимые усилия в этом направлении были сосредоточены на разработке алгоритмов, позволяющих с использованием ЭВМ проводить расчеты обтекания аэродинамических решеток с произвольными геометрическими параметрами и профилями сложной формы [2, 3].

Одним из эффективных инструментов для решения подобных задач является метод дискретных вихрей (МДВ), теоретические основы которого были заложены С.М. Белоцерковским. В работах, посвященных потенциальному обтеканию решеток профилей произвольной конфигурации, данный метод получил дальнейшее развитие и практическое применение [4]. С его помощью С.М. Белоцерковским и А.С. Гиневским были получены аэродинамические характеристики различных типов решеток [5].

Расширение возможностей метода достигнуто за счет его адаптации к моделированию вязких отрывных течений около тел сложной формы. В указанных исследованиях основная область течения описывается с использованием МДВ, что позволяет учитывать как глобальные особенности обтекания, так и локальные эффекты, связанные с отрывом потока [6-8]. Дальнейшее развитие подход получил в работах В.Н. Котовского, где рассмотрено нестационарное отрывное обтекание плоских решеток профилей, что представляет особый интерес для анализа нестационарных режимов работы лопаточных машин [9].

На сегодняшний день стандартные профили лопаток, применяемые в вентиляторных ступенях, детально исследованы как теоретически, так и экспериментально. Обобщенные данные по их аэродинамическим характеристикам представлены в трудах: М.Е. Колотникова [10-12], В.И. Милешина [13-18], А.П. Комарова [19], А.И. Бунимовича и А.А. Святогорова [20], И.В. Брусиловского [21], Ф.Д. Гегина [22], А.Б. Агульника [23-25], а также Ю.Б. Галеркина и Ю.А. Попова [26-31].

Параллельно с накоплением экспериментальных данных активно развивались методы целенаправленного поиска оптимальной геометрии профиля. В частности, Вандерплаатс [32] предложил алгоритм численной оптимизации, позволяющий при заданных ограничениях максимизировать тягу профиля при существенном сокращении количества обращений к решению прямой задачи обтекания. В работе Реджа П. [33] разработан подход к формированию профилей, обеспечивающих безударное (бескачковое) обтекание лопатки. Хасан с коллегами

[34] предложили метод построения профилей, у которых распределение давления на поверхности приближено к заданному. Несмотря на изящество и теоретическую обоснованность указанных обратных методов (работы [35-37]), их практическая эффективность в большинстве случаев не подтверждена экспериментальными данными.

Аналогичные принципы были адаптированы и для проектирования профилей решеток. Так, Рехтер и соавторы [38] разработали сверхкритические профили, применение которых в вентиляторной ступени позволило достичь измеримого улучшения характеристик при испытаниях. Хоббс и Вайнгольц [39] сформулировали требования к распределению скорости на поверхности профиля в условиях сверхкритического обтекания и продемонстрировали соответствующие примеры профилей. Дункер [40] провел экспериментальное исследование одноступенчатого трансзвукового вентилятора с двумя вариантами лопаток направляющего аппарата – стандартными (серии НАСА) и модифицированными с учетом диффузорности. Установлено снижение профильных потерь при использовании скорректированных лопаток.

Кравец и Савин [41] выполнили сравнительный анализ сверхкритических профилей с откорректированной диффузорностью и профилей серии ВС-10. На расчетном режиме модифицированные профили обеспечивали бескачковое обтекание, однако на нерасчетных режимах преимущества по сравнению с ВС-10 не выявлены. В работе Картера [42] представлены результаты продувок плоских решеток серии С-4 с варьируемым положением максимального прогиба профиля. Установлено, что смещение профиля в диапазоне от 0,3 до 0,6 оказывает существенное влияние на характеристики решетки:

- перемещение максимального прогиба к передней кромке расширяет диапазон устойчивой работы;
- смещение к задней кромке увеличивает поворот потока и критическое число Маха, однако сопровождается ростом потерь;
- наилучшие интегральные показатели достигаются при смещении на 0,5.

Монелло и соавторы [43] применили модифицированные профили при профилировании спрямляющих аппаратов высоконагруженных турбин. Профили конструировались прямым методом путем подбора распределений кривизны и толщины, направленного на снижение вероятности отрыва потока на всасывающей стороне. Полученные формы характеризовались смещением положений максимальной толщины и максимального прогиба к выходной кромке. Экспериментальные исследования на плоских и кольцевых решетках подтвердили улучшение аэродинамических характеристик. Авторы также обобщили результаты продувок диффузорных решеток в координатах эквивалентного угла раскрытия и эффективности торможения, выделив линию оптимальных значений, которая использовалась при выборе геометрии решетки.

Бекнев и Огнев [44, 45] исследовали плоские вентиляторные решетки с S-образными профилями, обеспечивающими равномерное распределение скорости на выходе из межлопаточного канала. Показано, что смещение максимума аэродинамической нагрузки к входной кромке снижает профильные потери, тогда как перенос нагрузки к выходной кромке уменьшает концевые потери почти на 50 %. На основе этих наблюдений была разработана методика профилирования, в которой форма средней линии профиля определяется из условия минимизации градиента скорости на выходе из канала. Полученные профили обладают S-образной средней линией с перегибом вблизи выходной кромки. Данный подход успешно применен при проектировании современных вентиляторных ступеней [46, 47].

Гото [48] сравнил аэродинамические характеристики вентиляторов с профилями NASA-65 и с оптимизированными лопатками, спрофилированными по заданному распределению скорости, исключая отрыв пограничного слоя. Модернизированные профили отличались меньшей кривизной средней линии в районе задней кромки и, соответственно, сниженной локальной нагрузкой. В результате КПД вентилятора повысился на 1,5–2 %.

Особого внимания заслуживает подход, предложенный Уислером [49], основанный на экспериментальном исследовании низкооборотной модели ступени с последующей индивидуальной корректировкой профилей. Измерения распределения статического давления на поверхности лопаток позволили выявить зону отрыва в корневой части всасывающей стороны. Коррекция профиля заключалась в увеличении нагрузки у передней кромки и смещении максимальной толщины вперед. В результате КПД вентилятора на расчетном режиме возрос на 0,8 %, а также повысилось создаваемое давление. В дальнейшем были разработаны профили с минимальным профильным сопротивлением, у которых максимальная толщина расположена вблизи выходной кромки. Испытания показали рост КПД на 1 %, однако расчетный режим оказался близок к границе устойчивости из-за склонности к отрыву в привтулочной зоне.

Сарен и Смирнов [50, 51] предложили метод решения обратной задачи для дозвуковых вентиляторов, основанный на итерационной коррекции средней линии исходного профиля с целью минимизации диссипации энергии несжимаемого потока. Полученные профили характеризуются удлиненным входным участком и смещением максимальной толщины к выходной кромке.

Анализ совокупности теоретических и экспериментальных исследований свидетельствует об отсутствии единого мнения относительно «универсально оптимальной» формы профиля. Это подчеркивает необходимость дальнейших комплексных исследований, учитывающих как аэродинамические, так и конструктивные и технологические ограничения.

Особый интерес представляют реверсивные осевые вентиляторы. Аэродинамические особенности и методы реализации реверсирования при использовании стандартных профилей

подробно рассмотрены в работах И.В. Брусиловского [52-54], Ю.Г. Московко [55], А.М. Красюка [56] и Н.А. Попова [57]. Наиболее распространенным решением при реверсировании путем изменения направления вращения (без поворота лопаток) являются S-образные профили. Их применение и эффективность продемонстрированы в исследованиях Чаоджина [58], Богдановича [59] и Дианжу [60].

Современные подходы к проектированию лопаточных венцов условно делятся на две группы:

– обратные методы – формирование геометрии профиля по заданному распределению давления или циркуляции;

– прямые методы – решение серии прямых задач обтекания с последующим выбором оптимального варианта.

Классический пример обратного подхода – методика Брусиловского [52-54], основанная на использовании теоретических характеристик плоских решеток стандартных профилей. В последние годы широкое распространение получили интегрированные методы, сочетающие обратное профилирование с трехмерным CFD-анализом вязкого течения. Так, методика Бекнева и Огнева [44, 45] дополнена расчетами пространственного течения в ANSYS CFX, что позволяет учитывать вторичные течения, отрывы и другие трехмерные эффекты.

Аналогичный подход реализован в коммерческой системе ADT (Advanced Design Technology), разработанной Зангеном [61]. В рамках этой методологии задаются распределения нагрузки по хорде и по высоте лопатки, после чего генерируется множество геометрических решений. Каждый вариант подвергается CFD-анализу (например, в TASCflow) для выявления зон отрыва и повышенных потерь. Окамото и соавторы [62] применили данный метод для разработки малошумного осевого вентилятора диаметром 182 мм: из 22 рассчитанных и 14 изготовленных вариантов был выбран оптимальный, продемонстрировавший рост КПД на 5,7 % и снижение уровня шума на 2,6 дБ(А) по сравнению с прототипом. В работе Куенга и др. [63] с использованием ADT и метода Response surface (RSM) разработан вентилятор для охлаждения электроники. Из 32 рассчитанных конфигураций отобран наилучший вариант, однако расхождение между CFD-прогнозом (ANSYS CFX) и экспериментальными данными оказалось значительным, что указывает на ограниченную точность современных моделей турбулентности в условиях сложного отрывного течения.

Несмотря на растущую роль зарубежных разработок, отечественные исследователи продолжают вносить весомый вклад в развитие теории и практики проектирования высокоэффективных вентиляторов. Это подтверждается публикациями последнего десятилетия, в частности работами Е.А. Батяева [64], Н.П. Косарева [65], а также Ю.Б. Галеркина и

Ю.А. Попова [28-30], в которых предложены новые подходы к оптимизации геометрии лопаточных венцов и повышению их аэродинамической эффективности.

В современных условиях одно из приоритетных направлений проектирования высокоэффективных и надежных вентиляторных ступеней КНД заключается в систематическом учете рассеяния геометрических параметров лопаточного аппарата, обусловленного производственными допусками и неизбежными отклонениями, возникающими в ходе технологических операций изготовления. Актуальность данного подхода подтверждается рядом исследований [66-68], демонстрирующих значимое влияние даже незначительных геометрических разбросов на эксплуатационные характеристики турбомашин. В частности, для осевых компрессоров установлено, что варьирование размеров профильной части лопаток в пределах установленных допусков может приводить к существенному разбросу газодинамических характеристик, включая изменение коэффициентов давления, расхода и эффективности [69-71].

## **1.2 Современный метод профилирования вентиляторных ступеней**

К настоящему времени классическая теория осевых вентиляторов получила стройное и логически завершенное теоретическое обоснование, отраженное в ряде фундаментальных исследований. Среди них особое значение имеет монография И.В. Брусиловского [54], характеризующаяся высокой степенью систематизации материала, глубиной физического анализа и ориентацией на инженерные приложения.

В условиях современного этапа развития авиационного двигателестроения, характеризующегося стремлением к повышению термодинамической эффективности, снижению удельного расхода топлива и обеспечению гарантированной надежности в широком диапазоне эксплуатационных режимов, все большее внимание уделяется вопросам проектирования лопаточных машин с учетом неопределенностей, обусловленных производственными отклонениями геометрических параметров. Такие отклонения, неизбежно возникающие в ходе технологических процессов изготовления и сборки, могут существенно влиять на газодинамические характеристики проточной части, а в совокупности – на устойчивость, шум и ресурс двигателя в целом.

В контексте настоящего диссертационного исследования представляется целесообразным акцентировать внимание на тех положениях указанной теории, которые непосредственно связаны с задачами профилирования лопаточных венцов и обоснованием исходных предпосылок для построения численных моделей. Разработка и верификация таких моделей составляют содержание последующих глав работы.

### 1.2.1 Кинематика потока

В рамках классической методологии анализа течения в осевых лопаточных машинах принимается гипотеза Н.Е. Жуковского [72], в соответствии с которой на расчетных режимах рабочая среда транспортируется вдоль семейства коаксиальных поверхностей тока. При этом обтекание кольцевой решетки профилей цилиндрическим потоком рассматривается как физически эквивалентное обтеканию бесконечной плоской решетки плоскопараллельным потоком при условии сохранения геометрического и кинематического подобия между соответствующими элементами течения.

На рисунке 1.1 приведены треугольники скоростей, построенные для произвольного радиуса ступени осевого вентилятора в соответствии со схемой «входной направляющий аппарат – рабочее колесо – спрямляющий аппарат» (далее по тексту – ВНА-РК-СА) [72]. Принятые на рисунке обозначения расшифровываются следующим образом:

- $C_a$  – осевая скорость потока (у вентилятора с цилиндрической проточной частью осевая скорость постоянна вдоль оси);
- $U = \omega r$  – переносная скорость (окружная скорость лопасти на радиусе  $r$ );
- $C_1, C_2, C_3$  – абсолютные скорости потока на входе в лопатки колеса, выхода из колеса (на входе в лопатки СА) и на выходе из лопаток СА;
- $C_{1u}, C_{2u}, C_{3u}$  – окружные составляющие скорости на входе и на выходе из лопаток колеса и на выходе из лопаток СА;
- $\omega_1, \omega_2$  – скорости потока в относительном движении на входе и на выходе из лопаток колеса;
- $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – углы входа и выхода из лопаток колеса, выхода из лопаток СА в абсолютном движении;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – углы входа и выхода потока, средний угол потока в решетке в относительном движении.

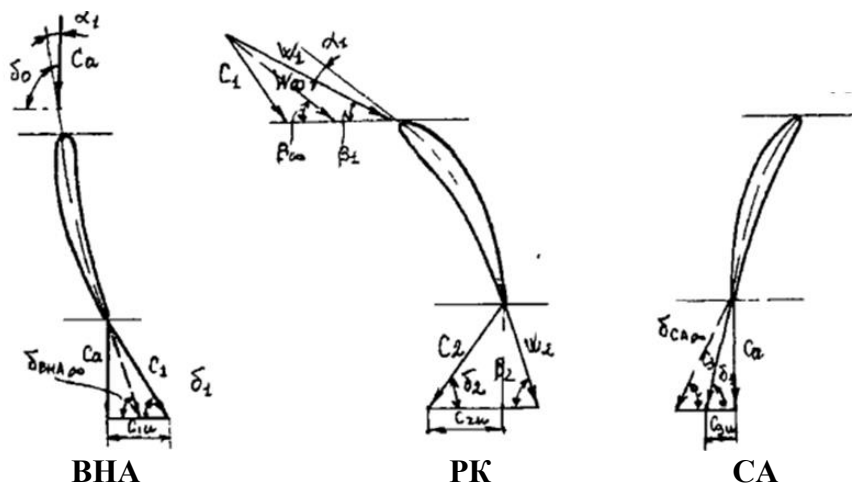


Рисунок 1.1 – Треугольники скоростей на радиусе  $r$  в вентиляторе схемы ВНА-РК-СА

Из треугольников скоростей (см. Рисунок 1.1) следует (1.1-1.3) [72]:

$$\cot \beta_3 = \cot \beta_1 + \cot \beta_2 \quad (1.1)$$

$$2 \theta_r = \beta_1 + \beta_2 + \alpha_2 + \alpha_1 \quad (1.2)$$

$$\omega_{1u} = U - C_{1u}; \quad \omega_{2u} = U - C_{2u}; \quad \omega_3 = U - (C_{1u} + C_{2u}) \quad (1.3)$$

Полученные соотношения справедливы исключительно для осевого вентилятора с цилиндрической формой проточной части. В случае решеток профилей лопаточных венцов неподвижных аппаратов входного направляющего и спрямляющего могут быть получены аналогичные зависимости, однако с существенным уточнением: вследствие отсутствия вращательного движения в неподвижных элементах переносная скорость равна нулю ( $u=0$ ), что приводит к тождественности векторов абсолютной и относительной скоростей ( $\omega=C$ ).

### 1.2.2 Геометрические параметры профиля лопатки

Решетка профилей характеризуется следующими параметрами (см. Рисунок 1.2) [72]:

- средняя линия профиля (у стандартного профиля – это дуга окружности);
- хорда профиля  $b$  – расстояние между носиком и хвостиком профиля;
- максимальный прогиб  $f$  и его расположение  $x_f$  относительно носика профиля;
- относительный прогиб  $\bar{f} = f/b$ ;
- геометрический угол установки  $\theta_r$ , угол между фронтом решетки и линией, соединяющей носик и хвостик профиля по средней линии;
- конструктивный угол установки  $\theta_k$ , угол между фронтом решетки и касательной к нижней поверхности профиля;
- угол  $\varphi_1$  между касательной в носике профиля и линией, соединяющей носик и хвостик профиля;
- $\alpha_{1(2)}$  – угол атаки на входе (угол отставания на выходе);
- угол  $\varphi_2$  между касательной в хвостике профиля и линией, соединяющей носик и хвостик профиля;
- в максимальная толщина профиля  $C_{max}$  (относительная толщина профиля  $\bar{C} = C/b$ ), для листовых профилей  $C_{max} = const$  по длине средней линии;
- симметричная часть – распределение толщины профиля по длине средней линии профиля ( $y_v$  – верхней части и  $y_n$  – нижней).

Локальная толщина профиля вдоль средней линии профиля определяется по формуле (1.4) [72]:

$$C = \bar{C} * b = 2y_v * b * \bar{C}_{max} \quad (1.4)$$

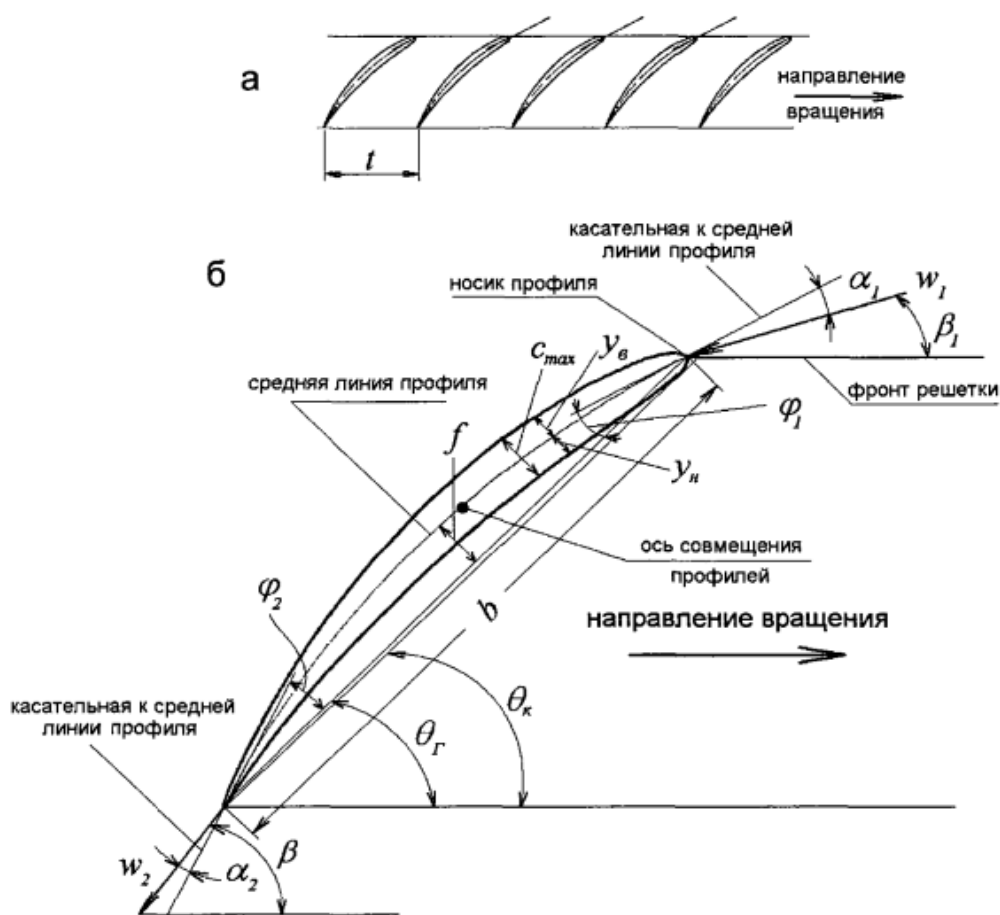


Рисунок 1.2 – Плоская решетка профилей (а) и «телесный» профиль (б)

На рисунке не показан угол  $\beta_\infty$  – угол протекания потока между средней скорости  $\omega_\infty$  (полусумма векторов  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) и фронтальной линией.

Таким образом, геометрическими параметрами, характеризующими плоскую решетку профилей, являются густота  $\tau$ , угол установки лопаток  $\theta_\Gamma$ , а также параметры, определяющие профиль: относительный прогиб  $f$ , относительная толщина  $\bar{C}$  и координаты верхнего и нижнего контуров профиля. С учетом требований к вентилятору, например, необходимость расширения диапазона эффективной работы при разных углах установки, необходимость реверсирования и способ реверсирования выбирается определенный тип профилей и относительная толщина  $\bar{C}$ . Распределение относительной толщины вдоль хорды стандартного профиля С-4 (средняя линия – дуга окружности), широко используемого в осевых вентиляторах приведено в таблице 1.1 [21].

Таблица 1.1 – Распределение относительной толщины вдоль хорды стандартного профиля С-4

$\bar{x}_s$	0	0,006	0,012	0,025	0,05	0,075	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,95	0,975	1,0
$\bar{y}_s$	0	0,1	0,13	0,18	0,27	0,32	0,37	0,47	0,5	0,48	0,43	0,36	0,29	0,20	0,07	0,05	0

### 1.2.3 Расчет лопаточной системы вентиляторной ступени

В осевом вентиляторе, в отличие от радиального, закрученный поток ограничен цилиндрическим корпусом вентилятора, поэтому на расчетном и близких режимах поток движется по коаксиальным поверхностям, с осью, являющейся осью вращения колеса. Наличие закрученного потока приводит к тому, что за каждым лопаточным венцом организуется соответствующее геометрии венца распределение окружной (тангенциальной)  $C_{2u}$  и осевой  $C_a$  составляющих скорости. Условие существования закрученного потока за лопаточным венцом описывается уравнением радиального равновесия, которое для случая течения по коаксиальным поверхностям ( $C_r = 0$ ) и при неизменной по оси вентилятора осевой составляющей скорости  $C_a$  имеет вид (1.5) [72]:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho * C_u^2}{r} C \quad (1.5)$$

Осевые вентиляторы в большинстве случаев (если нет специальных требований к аэродинамическим характеристикам вентилятора) проектируются на условие постоянства циркуляции по радиусу  $rC_u = const$ . Это условие означает постоянство полного давления вентилятора и, как частный случай, осевой скорости по радиусу. Для обеспечения безотрывного течения в привтулочных областях при заданных параметрах  $\psi_T, \varphi_a$  существует ограничение на минимально возможный относительный диаметр втулки колеса  $v$ . Если не выполнено это ограничение, то на расчетном режиме имеет место привтулочный отрыв в колесе (или спрямляющем аппарате), что резко ухудшает аэродинамические характеристики вентилятора.

Приведем кратко алгоритм проектирования осевых вентиляторов. Исходными данными для расчета лопаточной системы осевого вентилятора являются полное давление  $P_V$  и производительность вентилятора  $Q$ .

Первым шагом является выбор диаметра колеса  $D$  и частоты вращения  $n$ . Если нет габаритных ограничений на диаметр  $D$  вентилятора и прочностных ограничений на частоту вращения  $n$ , то выбор этих величин является многовариантным процессом. По принятым значениям  $D$  и  $n$  вычисляются безразмерные параметры вентилятора: коэффициент осевой скорости  $\varphi_a$  и коэффициент давления  $\psi$ .

Далее с использованием зависимостей, построенных на обобщенных данных по потерям в лопаточных венцах вентиляторов различных аэродинамических схем и параметров, определяется полный КПД вентилятора выбранной схемы (при соответствующих параметрах  $\psi$  и  $\varphi_a$ ). Процесс перебора значений  $D$  и  $n$  прекращается, если полный КПД вентилятора близок к максимальному значению. Затем вычисляется коэффициент теоретического давления вентилятора  $\psi_T = \psi/\eta$ . Полученные таким образом безразмерные параметры позволяют спроектировать вентилятор с практически безотрывным течением в проточной части. Однако для

получения минимальных габаритов (массы), минимального шума при сохранении высокой аэродинамической эффективности, вентилятор должен иметь расчетные параметры  $\psi_T, \varphi_a$  и  $v$ , близкие к предельно возможным для данной схемы. Предельное сочетание расчетных параметров  $\psi_T, \varphi_a$  и  $v$  накладывает ограничение на минимальную величину относительного диаметра втулки  $V$ , при которой существует безотрывное течение в привтулочных областях при заданных величинах  $\psi$  и  $\varphi_a$ .

На втором шаге производится расчет течения в межвенцовых зазорах, то есть определяются кинематика потока (треугольники скоростей) на каждом расчетном радиусе. Именно эти параметры потока и должны обеспечить проектируемые лопаточные аппараты.

Уравнение движения воздуха в межвенцовых зазорах осевого одноступенчатого вентилятора выводятся из уравнения радиального равновесия (1.5). В безразмерном виде для вентиляторной ступени (1.6) [72]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}_{0i}}{d\bar{r}} = \frac{d\bar{C}_{1a}^2}{d\bar{r}} + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{d}{d\bar{r}} (\bar{r}\bar{C}_{1u})^2 i = 0, 1, 2, 3 \quad (1.6)$$

Или если ввести безразмерные расчетные параметры:

– закрутку потока за ВНА (1.7) [72]:

$$n_1 = \frac{\bar{C}_{1u}}{\bar{C}_{2u} - \bar{C}_{1u}} \quad (1.7)$$

– закрутку потока за СА (1.8) [72]:

$$n_2 = \frac{\bar{C}_{3u}}{\bar{C}_{2u}} \quad (1.8)$$

– а также (1.9) [72]:

$$\bar{r}\bar{C}_{1u} = \frac{n_1\psi_T}{2}, \quad \bar{r}\bar{C}_{2u} = \frac{(1+n_1)\psi_T}{2}, \quad \bar{r}\bar{C}_{3u} = \frac{n_2(1+n_1)\psi_T}{2} \quad (1.9)$$

Для полной схемы одноступенчатого осевого вентилятора схемы (ВНА-РК-СА) (1.10) [72]:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{C}_{1a}^2}{d\bar{r}} &= -\frac{1}{4\bar{r}^2} \frac{d}{d\bar{r}} (n_1\psi_T)^2 \\ \frac{d\bar{C}_{2a}^2}{d\bar{r}} &= \frac{d\psi_T}{d\bar{r}} - \frac{1}{4\bar{r}^2} \frac{d[(1+n_1)\psi_T]^2}{d\bar{r}} \\ \frac{d\bar{C}_{3a}^2}{d\bar{r}} &= \frac{d\psi_T}{d\bar{r}} - \frac{1}{4\bar{r}^2} \frac{d[n_2(1+n_1)\psi_T]^2}{d\bar{r}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Помимо уравнений (1.10) должно соблюдаться уравнение расхода (1.11) [72]:

$$\int_v^1 \bar{C}_{1a} \bar{r} d\bar{r} = \frac{1-v^2}{2} \varphi_{ap}, \quad (1.11)$$

а также такое распределение циркуляции, при котором средняя циркуляция лопаточного венца должна быть равна принятой расчетной (1.12) [72]:

$$\int_v^1 \psi_T \bar{r} d\bar{r} = \frac{1-v^2}{2} \psi_{TP}; \quad \int_v^1 n_1 \psi_T \bar{r} d\bar{r} = \frac{1-v^2}{2} n_1 \psi_{TP}$$

$$\int_v^1 n_2 (1+n_1) \psi_T \bar{r} d\bar{r} = \frac{1-v^2}{2} n_{2P} (1+n_{1P}) \psi_{TP}$$
(1.12)

Распределение по радиусу в лопаточных венцах циркуляции  $\psi_T(\bar{r})$ ,  $n_1(\bar{r})$ ,  $n_2(\bar{r})$  может быть произвольным. Наиболее часто при проектировании венцов используется постоянное по радиусу распределение  $\psi_T(\bar{r})$  или несколько увеличивающееся к периферии. При этом для РК вентилятора формулы принимают следующий вид (1.13) [72]:

$$\cot \beta_1 = \frac{\bar{r} - \frac{n_1 \psi_T}{4\bar{r}}}{\bar{C}_a}$$

$$\cot \beta_2 = \frac{\bar{r} - \frac{(1+n_1) \psi_T}{4\bar{r}}}{\bar{C}_a}$$

$$\cot \beta_\infty = \frac{1}{2} (\cot \beta_1 + \cot \beta_2)$$

$$\bar{\omega}_1 = \frac{\bar{C}_a}{\sin \beta_1}; \quad \bar{\omega}_2 = \frac{\bar{C}_a}{\sin \beta_2}; \quad \bar{\omega}_\infty = \frac{\bar{C}_a}{\sin \beta_\infty}$$
(1.13)

Установим связь между кинематикой решетки и силовыми характеристиками профилей. При обтекании идеальным несжимаемым потоком на каждую лопатку действует циркуляционная сила Жуковского (см. Рисунок 1.3), направленная по нормали к средней векторной скорости  $\bar{\omega}_\infty$ .

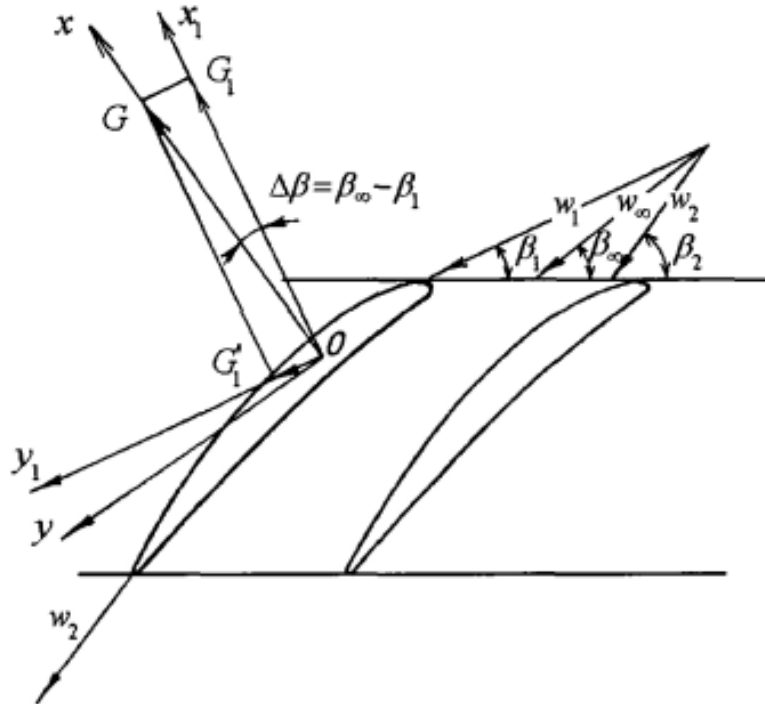


Рисунок 1.3 – Схема сил, действующих на профиль в решетке при обтекании невязким потоком

Коэффициент силы Жуковского (1.14) [72]:

$$C_{\text{ж}} = \frac{G}{b\rho \frac{\omega_{\infty}^2}{2}} \quad (1.14)$$

В безразмерных параметрах коэффициенты  $C_{\text{ж}}$  для венцов можно записать как:

– для ВНА (1.15) [72]:

$$C_{\text{ж}} = \frac{n_1 \psi_T}{r \omega_{\infty} \tau} \quad (1.15)$$

– для РК (1.16) [72]:

$$C_{\text{ж}} = \frac{\psi_T}{\bar{r} \omega_{\infty} \tau} \quad (1.16)$$

– для СА (1.17) [72]:

$$C_{\text{ж}} = \frac{(1 + n_1)(n_2 - 1)\psi_T}{\bar{r} \omega_{\infty} \tau} \quad (1.17)$$

Далее, следуя [21], по полученным результатам расчета течения в межвенцовых зазорах (при коэффициенте учета вязкости  $K_k = 1$ ) по обобщенным экспериментальным характеристикам плоских и кольцевых вращающихся решеток профилей определяется густота  $\tau$  и задаются расчетные углы атаки  $\alpha_1$ .

В методике используются теоретические характеристики плоских решеток, обтекаемых потенциальным потоком идеальной жидкости [73]. Для перехода к идеальной жидкости искусственно увеличивается циркуляция лопаточных венцов и производится повторный расчет течения в межлопаточных венцах, но уже при коэффициенте теоретического давления, увеличенном на величину  $K_r$ -коэффициента учета вязкости, то есть (1.18) [73]:

$$\psi_{T\text{ид}}(\bar{r}) = K_r * \psi_T(\bar{r}) \quad (1.18)$$

Далее производится так называемое профилирование, которое заключается в определении для каждого расчетного сечения по радиусу геометрии плоской решетки профилей, обеспечивающей при заданных значениях угла входа потока  $\beta_1$ , густоты  $\tau$  и угла атаки  $\alpha_1$  необходимый угол выхода потока или коэффициент силы Жуковского  $C_{\text{ж}}$ .

Коэффициенты силы Жуковского  $C_{\text{ж}}$ , определенные по формулам (1.15-1.17), являются исходными для определения геометрии, обеспечивающей заданные треугольники скоростей или расчетный поворот потока  $\Delta\beta$  при данной густоте  $\tau$ . Между ними существует связь (1.19) [73]:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = \tan^{-1} \frac{1 - \left(\frac{\tau C_{\text{ж}}}{4}\right)^2}{\frac{\tau C_{\text{ж}}}{2} \sin \beta_{\infty}} \quad (1.19)$$

Профилирование лопаточных венцов осевых вентиляторов проводится с использованием теоретических характеристик решеток профилей, полученных методом конформного отображения.

Метод основан на интерполяции значений  $C_y$ , определенных по [73] для решеток, имеющих различные углы входа потока  $\beta$ , соответствующие бесциркуляционному обтеканию. Значения  $dC_y/d\alpha$  и  $\alpha_0$  получены методом конформных отображений в [73] для профилей, имеющих практически неизменную форму симметричной части и средней линии. Эти профили имеют форму, близкую к стандартному профилю С-4, который имеет максимальную толщину на расстоянии  $\bar{x}_c = 0,3$  хорды и среднюю линию - дугу окружности. В работе [6] значения  $dC_y/d\alpha$  и  $\alpha_0$  получены методом дискретных вихрей для тонких профилей. Использование затабулированных  $dC_y/d\alpha$  и  $\alpha_0$  предполагает единообразие профилей при профилировании.

Таким образом, метод, представленный в работе [21], позволяет проектировать лопаточные венцы со стандартными профилями (близкими к С-4). Для применения этого метода к профилям произвольной формы требуется его доработка.

#### 1.2.4 Современный подход к расчету лопаточной системы вентиляторной ступени

Обобщенная методика проектирования вентиляторных ступеней, приведенная в работах [74, 75], представлена на рисунке 1.4. Процесс разработки вентилятора условно разделен на два этапа – одномерное и трехмерное проектирование.

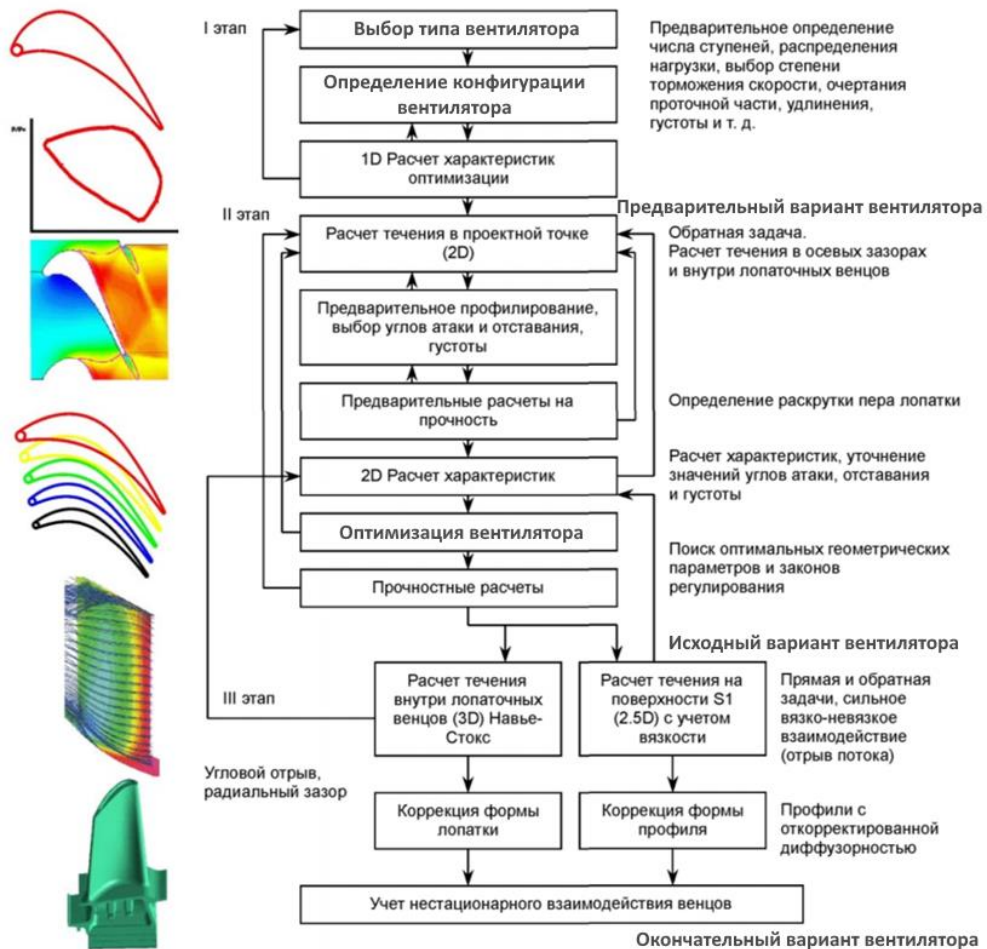


Рисунок 1.4 – Схема проектирования вентиляторных ступеней

На этапе одномерного проектирования определяются ключевые энергетические и газодинамические параметры вентилятора: степень повышения давления, расход рабочего тела, ожидаемый уровень КПД, запас газодинамической устойчивости, а также тяга. Одновременно устанавливаются требования к поведению машины при отклонениях от расчетного режима, включая работу на малых и максимальных нагрузках. На основе выбранных параметров выполняется расчет проточной части с применением одномерных моделей течения, результатом которого становится построение скоростного профиля потока, позволяющего обосновать дальнейшую геометрическую проработку лопаточных венцов.

На этапе трехмерного проектирования осуществляется формирование профилей лопаток и их согласование по радиусу, что определяет геометрию проточной части. Далее проводится анализ напряженно-деформированного состояния лопаточных элементов с учетом эксплуатационных нагрузок.

Если полученные лопатки не отвечают требованиям прочности, производится корректировка формы профиля с сохранением аэродинамических характеристик. После достижения варианта, удовлетворяющего газодинамическим и прочностным критериям, выполняется проверочный расчет. При выявлении отклонений процесс итерационно уточняется.

Этап трехмерного проектирования представляет собой итерационный процесс, включающий последовательное уточнение геометрии, численное моделирование, анализ результатов и корректировку параметров. Ввиду высокой трудоемкости, рациональным подходом является автоматизация проектирования с использованием методов математической оптимизации [76-78]. Автоматизированный подход позволяет систематически исследовать влияние геометрических и режимных параметров на характеристики ступени, минимизируя субъективное вмешательство. В качестве управляемых переменных могут выступать углы установки лопаток, распределение толщин, хорда и другие параметры, влияющие на аэродинамическое качество.

Одной из ключевых проблем, ограничивающих ресурс и надежность вентиляторных ступеней, является статическая и вибрационная прочность рабочих лопаток вентилятора, отстройка собственных частот от резонансов, обеспечение динамической устойчивости, исключение вращающегося срыва и флаттера [66, 79, 80, 81].

В данной работе прямая оценка динамики лопаток не проводилась. Рассматриваются только результаты статических прочностных расчетов, так как они влияют на деформации лопаток, а также проводится анализ чувствительности к производственным отклонениям интегральных показателей эффективности вентиляторной ступени, что позволяет при приемлемых вычислительных затратах оценить влияние технологических факторов на напряженно-деформированное состояние лопаточного венца.

Аспекты обеспечения вибрационной прочности рабочих лопаток вентилятора, включая анализ спектров собственных частот и устойчивости к резонансным явлениям с учетом технологического разброса геометрии, были всесторонне исследованы в работе [82].

### **1.2.5 Предложенный подход к расчету лопаточной системы вентиляторной ступени**

Анализ рассмотренных методов аэродинамического проектирования лопаток вентилятора свидетельствует о высокой степени сложности задачи формирования рациональной геометрии профиля, обусловленной многофакторностью физических процессов, протекающих в проточной части. Эффективное профилирование требует не только учета трехмерного характера течения, но и комплексного управления такими явлениями, как волновые и вторичные потери, развитие пограничных слоев, а также обеспечение устойчивости работы на различных режимах. В связи с этим традиционные подходы к проектированию уступают место современным интегрированным методологиям, основанным на использовании вычислительных технологий нового поколения.

Одним из наиболее перспективных направлений является применение систем автоматизированной математической оптимизации в сочетании с трехмерным численным моделированием. Такой подход позволяет осуществлять целенаправленный поиск оптимальной формы лопаточного профиля с учетом множества критериев эффективности и устойчивости. Высокая точность 3D-решателей обеспечивает адекватное воспроизведение сложных течений, включая трансзвуковые и околозвуковые режимы, что особенно важно для высоконагруженных ступеней вентилятора. В результате реализуется возможность формирования профилей, обладающих высоким уровнем аэродинамического совершенства и надежности в широком диапазоне рабочих условий – от дозвуковых до сверхзвуковых скоростей потока по относительной скорости на периферии рабочего колеса.

Задача оптимизации геометрической формы и взаимного расположения лопаток в ступенях вентилятора характеризуется рядом существенных особенностей, обуславливающих высокую степень ее сложности и требующих применения специализированных подходов к решению.

Во-первых, параметризация геометрии лопаток и их пространственного положения в лопаточных венцах требует введения значительного числа управляющих переменных, включая параметры профиля, законов кручения, смещений, а также углов установки по высоте. В то же время практические ограничения, накладываемые на вычислительные ресурсы и устойчивость алгоритмов, зачастую вынуждают сокращать число независимых параметров, что усложняет поиск глобального оптимума.

Во-вторых, структура и топология целевой функции, как правило, не поддается аналитическому описанию. Ее поведение в пространстве проектных параметров является слабо

предсказуемым, а поверхность отклика может содержать множество локальных экстремумов, плато и зон слабой чувствительности, что затрудняет применение классических градиентных методов оптимизации.

В-третьих, целевая функция может демонстрировать разрывы или резкие изменения значений, обусловленные как физическими эффектами (например, возникновением отрывных течений или скачков уплотнения), так и численной неустойчивостью, присущей трехмерному CFD-моделированию многоступенчатых проточных частей. Это особенно актуально при расчетах на нестационарных или близких к границе помпажа режимах, где сходимость решений не всегда гарантирована.

В-четвертых, для реализации эффективной оптимизации необходима высокоточная численная модель рабочего процесса, способная достоверно прогнозировать изменение аэродинамических характеристик (КПД, степень повышения давления, запас газодинамической устойчивости) при варьировании проектных параметров. При этом математическая модель должна обладать приемлемой вычислительной эффективностью, поскольку решение задачи оптимизации, как правило, требует проведения от тысячи до трех тысяч расчетных итераций, что делает использование ресурсоемких полноразмерных нестационарных моделей зачастую непрактичным.

Указанные особенности задачи аэродинамического проектирования определяют целесообразность применения в процессе формирования рациональной геометрии профиля рабочих лопаток вентиляторной ступени методов многодисциплинарного анализа чувствительности, ориентированных на учет вариабельности геометрических параметров. Данный подход предполагает системный анализ влияния не только номинальных проектных параметров, но и их возможных отклонений, обусловленных производственными допусками и эксплуатационными факторами. Оценка устойчивости аэродинамических характеристик к таким вариациям становится ключевым элементом повышения надежности и предсказуемости работы лопаточной системы в реальных условиях.

Интеграция анализа чувствительности с высокоточным трехмерным численным моделированием на основе решения полных уравнений Навье -Стокса обеспечивает возможность реализации комплексной стратегии проектирования, в которой критерии энергетической эффективности дополняются требованиями к технологичности, воспроизводимости и эксплуатационной устойчивости. Такой интегрированный подход позволяет не только находить геометрические конфигурации с высоким уровнем аэродинамического совершенства, но и обеспечивать их устойчивость к реальным производственным и функциональным неопределенностям, что существенно повышает практическую ценность получаемых проектных решений.

Предлагаемая методология обеспечивает автоматизированный поиск рациональной геометрии лопатки с одновременным учетом множества критериев оптимальности: максимизация полного КПД, обеспечение достаточного запаса по газодинамической устойчивости, минимизация профильных, волновых и вторичных потерь, а также адаптация формы профиля к особенностям трехмерного нестационарного течения в проточной части. Особое значение при этом приобретает использование реалистичных геометрических моделей, включающих типовые производственные отклонения, что позволяет повысить достоверность численного анализа и приблизить результаты моделирования к физическим условиям функционирования ступени.

Применение интегрированного подхода, объединяющего вероятностный анализ чувствительности, высокоточное 3D-моделирование и многокритериальную оптимизацию, открывает возможности для создания лопаточных профилей с высоким уровнем аэродинамического совершенства в широком диапазоне рабочих режимов – от дозвуковых до трансзвуковых и околозвуковых условий течения. Данный методологический подход активно используется при разработке перспективных ступеней вентилятора для современных газотурбинных двигателей, что находит отражение в многочисленных научных и прикладных исследованиях [83-85].

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

Проанализировано современное состояние проектирования вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей в условиях необходимости обеспечения технологической независимости и импортозамещения. Выявлена ключевая проблема: традиционные методы оптимизации геометрии лопаток, ориентированные на достижение максимальных характеристик в идеализированных («номинальных») условиях, часто не обеспечивают требуемой надежности и эффективности при наличии реальных производственных отклонений. Установлено, что игнорирование технологической дисперсии приводит к снижению эксплуатационных качеств двигателя, что требует перехода к междисциплинарному подходу, учитывающему неопределенности геометрических параметров.

Проведен обзор классических и современных подходов к аэродинамическому проектированию осевых вентиляторов, включая методы конформного отображения, дискретных вихрей и трехмерного CFD-моделирования. Показано, что, несмотря на развитие обратных задач профилирования и систем автоматизированной оптимизации (ADT, RSM), большинство промышленных методик остаются детерминированными и не интегрируют статистические данные о производственном разбросе геометрии на ранних этапах проектирования. Отмечена

высокая вычислительная сложность полномасштабной трехмерной оптимизации, требующая разработки эффективных моделей и методов анализа чувствительности.

Объектом исследования определены рабочие лопатки вентиляторной ступени компрессора низкого давления, характеризующиеся сложной пространственной геометрией и высокой чувствительностью аэродинамических и прочностных характеристик к малым изменениям формы. Предметом исследования является влияние геометрических отклонений, обусловленных технологическими допусками изготовления, на комплекс показателей эффективности (КПД, степень повышения давления, тяга) и надежности (напряженно-деформированное состояние) лопаточного аппарата.

Сформулирована цель работы: повышение эксплуатационной эффективности и конструктивной надежности рабочих лопаток вентилятора за счет разработки методики многодисциплинарного анализа чувствительности их геометрических параметров к производственным отклонениям. Определен перечень задач, включающий идентификацию ключевых варьируемых параметров, статистическое моделирование производственных допусков, численную реализацию сопряженных аэродинамических и прочностных расчетов, а также оценку возможности линеаризации моделей отклика для ускорения процедур оптимизации.

Обоснована научная новизна предлагаемого подхода, заключающаяся в системном учете вероятностных характеристик технологической дисперсии при многодисциплинарном анализе. Подчеркнута практическая значимость работы: разработанные методики и программные инструменты позволяют сократить затраты на НИОКР за счет раннего выявления критических геометрических параметров, оптимизации допусков и повышения предсказуемости характеристик серийных двигателей, что соответствует стратегическим задачам развития отечественного авиадвигателестроения.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРОФИЛЯ ПЕРА ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

Современный авиационный двигатель представляет собой высокотехнологичное изделие, характеризующееся сложной конструкцией и предъявлением повышенных требований к точности геометрических параметров как отдельных деталей, так и сборочных узлов в целом. Обеспечение заданной точности достигается за счет совершенства технологических процессов производства и сборки, ключевым элементом которых является контроль геометрических характеристик [86-92]. Надежность и эффективность функционирования ГТД в значительной степени определяются качеством выполнения этих операций, что делает контроль неотъемлемой частью технологической цепочки.

Конструктивная специфика авиационных ГТД обуславливает уникальность номенклатуры деталей, отличающихся сложной пространственной формой, обусловленной аэродинамическими, термическими и прочностными требованиями. Вследствие этого к геометрической точности таких деталей предъявляются жесткие нормативы, реализуемые на всех этапах технологического цикла – от стадии проектирования до момента финальной доводки изделия.

Традиционно контроль геометрических параметров в авиационном двигателестроении осуществляется с использованием специализированных контрольно-измерительных приспособлений (КИП) [93-96]. Данные средства измерений, как правило, разрабатываются под конкретную деталь или группу конструктивно близких изделий и предназначены для контроля ограниченного набора параметров – линейных размеров, формы и взаимного расположения поверхностей. КИП обеспечивают воспроизводимость измерений в пределах установленной погрешности и широко применяются в серийном производстве.

Однако данный подход сопряжен с рядом существенных ограничений. Во-первых, постоянное повышение требований к точности измерений делает традиционные КИП недостаточно эффективными в условиях современных технологических стандартов. Во-вторых, необходимость разработки и изготовления большого количества специализированных приспособлений приводит к значительным материальным и временным затратам, особенно в условиях опытного и мелкосерийного производства. В-третьих, длительные сроки проектирования, изготовления и аттестации КИП замедляют процессы освоения новых изделий, снижая гибкость производственной системы.

В связи с этим все большее распространение получает перспективный подход к контролю, основанный на применении трехкоординатных координатно-измерительных машин (КИМ). Современные средства измерений отличаются высокой универсальностью, расширенными

функциональными возможностями и обеспечивают высокую точность измерений. Важным преимуществом КИМ по сравнению с традиционными КИП является возможность получения плотной сетки измерительных точек, что позволяет проводить детальный анализ геометрии сложно-профильных поверхностей, в отличие от дискретного двух- или трехточечного контроля, реализуемого в специализированных приспособлениях.

Общий алгоритм методики контрольно-измерительных мероприятий профиля пера рабочей лопатки вентилятора представлен в виде блок-схемы на рисунке 2.1. Данная методика представляет собой систематизированное и детализированное описание последовательности операций, обеспечивающих получение точных геометрических данных, необходимых для построения параметрической 3D-модели лопатки в САД-системе.

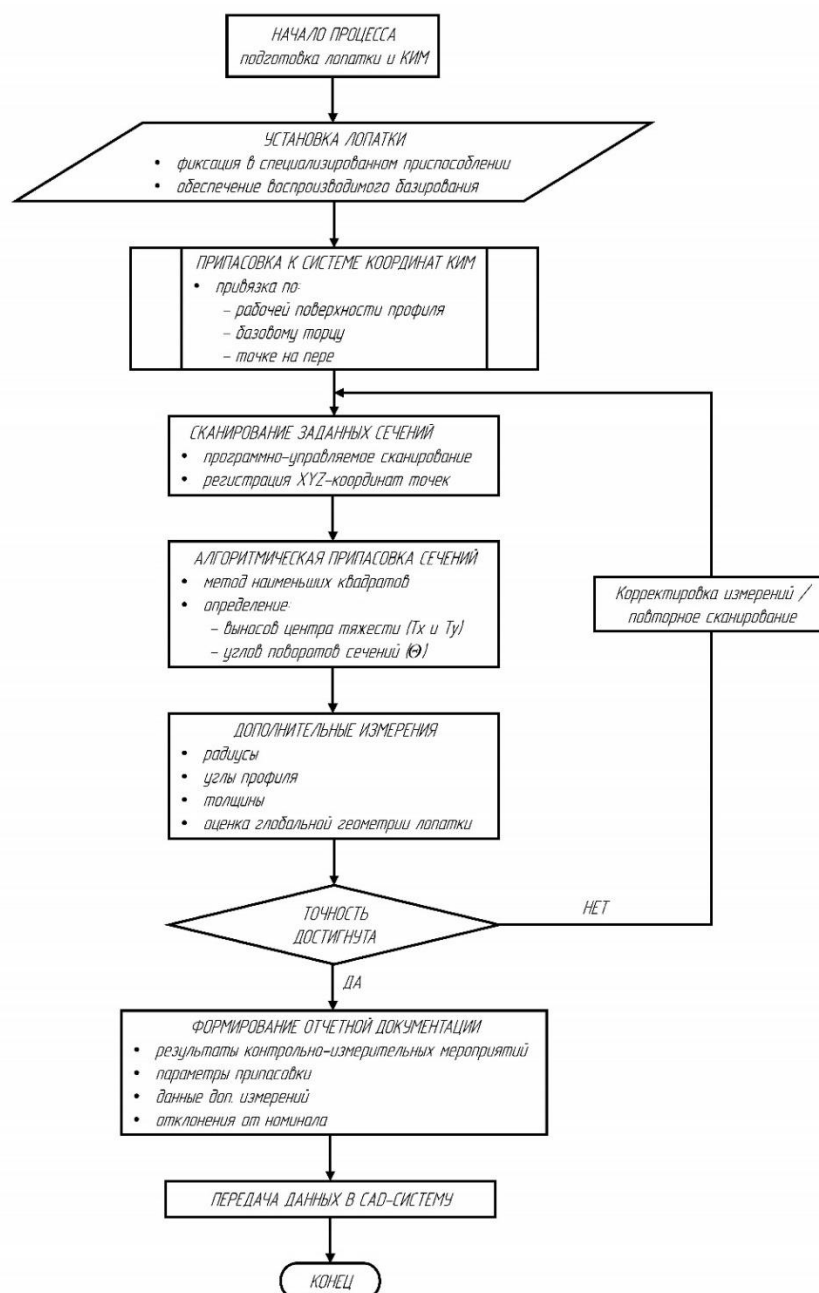


Рисунок 2.1 – Алгоритм контрольно-измерительных мероприятий профиля пера рабочей лопатки вентилятора

В сочетании с современными системами компьютерного моделирования, обработки и визуализации данных, КИМ обеспечивают комплексный анализ геометрических отклонений, включая отклонения формы, расположения и взаимного положения поверхностей [97-99]. Это открывает возможности для интеграции процессов контроля в цифровые производственные цепочки, включая обратную связь с CAD/CAM/CAE-системами, что способствует повышению качества, сокращению сроков разработки и гибкости производственных процессов.

## **2.1 Общие положения**

### **2.1.1 Объект методики**

Объектом настоящей методики является рабочая лопатка вентилятора компрессора низкого давления авиационного газотурбинного двигателя.

### **2.1.2 Цель методики**

Методика направлена на систематизированное описание процесса контрольно-измерительных мероприятий рабочих лопаток вентилятора с целью получения геометрических данных для построения их 3D-моделей в CAD-системах.

## **2.2 Общие требования к условиям, обеспечению и проведению контрольно-измерительных мероприятий рабочих лопаток вентилятора**

### **2.2.1 Место проведения измерений**

Измерения проводятся в лаборатории ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск).

### **2.2.2 Требования к условиям проведения измерений**

1. Температура: +18...+22 °С.
2. Атмосферное давление: 700...770 мм. рт. ст.
3. Относительная влажность воздуха: от 40 до 80% (без конденсата).
4. Максимальный временной температурный градиент:
  - в течение 1 часа: 1 °С/ч;
  - в течение 24 часов: 2 °С/24ч.
5. Максимальный линейный температурный градиент: 0,5 °С/м.
6. Параметры электрического питания:
  - напряжение переменного тока: 220±10% В;
  - частота переменного тока: 50/60 Гц.

### **2.2.3 Требования к подготовке КИМ для проведения контрольно-измерительных мероприятий**

1. КИМ должна быть приведена в рабочее состояние.
2. Должна быть проведена поверка в соответствии с МИ 2569-99 «Рекомендация. ГСИ. Машины координатно-измерительные портального типа. Методика поверки» [100].

### **2.2.4 Общая характеристика объекта измерений**

Массогабаритные характеристики рабочей лопатки вентилятора компрессора низкого давления авиационного газотурбинного двигателя:

1. Длина×Ширина×Высота: 210×190×435 мм.
2. Масса: 2,25 кг.
3. Материал: титановый сплав ВТ6.

### **2.2.5 Перечень средств измерений**

1. КИМ: СММ Coord3 Hera NT – 1 шт.
2. Измерительная головка: Renishaw PH10M – 1 шт.

### **2.2.6 Описание средств измерений**

Одним из наиболее перспективных решений в области прецизионных измерений сложно-профильных деталей является КИМ COORD3 HERA NT [101]. В данной работе представлены ее технические характеристики, принцип действия и особенности применения при измерении геометрии профиля пера рабочей лопатки вентилятора.

КИМ COORD3 HERA NT относится к классу мостовых машин с подвижным порталом, что обеспечивает высокую жесткость конструкции и минимальные деформации при перемещении измерительной головки. Основание машины изготовлено из высококачественного гранита, обладающего низким коэффициентом теплового расширения и высокой виброустойчивостью – важные факторы, способствующие достижению прецизионной точности измерений.

Машина оснащена трехкоординатной системой перемещения (X, Y, Z), в которой используются линейные сервоприводы, обеспечивающие плавное и высокоточное позиционирование измерительной головки. Каждая координатная ось снабжена оптическими инкрементальными энкодерами с разрешением до 0,001 мкм, что позволяет фиксировать микронные отклонения формы поверхности детали. Для минимизации влияния температурных деформаций в конструкции предусмотрена система активной термокомпенсации, включающая датчики температуры, размещенные в станине, на рабочем столе и непосредственно на

измеряемой детали. Это обеспечивает коррекцию измерительных данных в реальном времени в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО 10360-2-2017 [102].

В качестве измерительной головки используется, как правило, револьверная система (например, PH10M от Renishaw), позволяющая автоматически изменять ориентацию щупа и производить смену наконечников без вмешательства оператора. Такое решение существенно расширяет возможности измерения в труднодоступных зонах – например, на передних и задних кромках лопатки – без необходимости повторной установки детали. Возможна установка как контактных щупов с алмазными или керамическими наконечниками (минимальный радиус – 0,3 мм), так и бесконтактных датчиков, включая лазерные сканеры и белоцветные сенсоры (например, HP-O), что делает КИМ универсальной при контроле хрупких, полированных или легко повреждаемых поверхностей.

Общий вид КИМ COORD3 HERA NT, оснащенной измерительной головкой PH10M от Renishaw, представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Общий вид средств измерений  
(а – КИМ портального типа COORD3 HERA NT; б – измерительная головка Renishaw PH10M)

В свою очередь основные технологические и метрологические характеристики средств измерений представлены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Технические характеристики

№ п/п	Параметр	Значение
1	Тип конструкции	Мостовая КИМ с подвижным порталом
2	Рабочий объем (X×Y×Z)	2000 x1500 x 1000 мм
3	Скорость перемещения	до 600 мм/с
4	Система отсчета положения	Оптические энкодеры с разрешением 0,001 мкм
5	Измерительная головка	RH10M (Renishaw) или аналог, с автоматической сменой щупов и наклоном
6	Тип щупов	Контактные (керамические, алмазные)
7	Система термокомпенсации	Многосенсорная, с коррекцией в реальном времени
8	Станина	Гранитные плиты, класс 00 по ISO 8512-2

Таблица 2.2 – Метрологические характеристики

Верхний предел измерений линейных размеров по оси (мм)			Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерительной головки, (мкм)	Пределы допускаемой абсолютной погрешности объемных измерений (L – в мм) (мкм)
X	Y	Z		
от 700 до 2000	700	500	±1,7	±(1,7+3,0L/1000)

### 2.3 Порядок проведения контрольно-измерительных мероприятий

Контрольно-измерительные мероприятия включают 6 последовательных этапов [103-105]:

1. Установка рабочей лопатки вентилятора в специализированное фиксирующее устройство с обеспечением стабильного и воспроизводимого базирования.
2. Припасовка (привязка) положения лопатки относительно системы координат КИМ по базовым поверхностям: рабочей поверхности профиля, базовому торцу и точке на пере.
3. Измерение заданных сечений лопатки с регистрацией координат точек их поверхностей с использованием программно-управляемого сканирования.
4. Алгоритмическая припасовка измеренных сечений к номинальной геометрии методом наименьших квадратов с определением величин выносов и углов поворота сечений относительно расчетного положения.
5. Проведение дополнительных измерений, включающих контроль параметров отдельных сечений (радиусы, углы, толщины) и оценку глобальной геометрии лопатки в целом.
6. Формирование и регистрация отчетной документации, включающей результаты измерений, полученные на КИМ, а также данные дополнительных контрольных операций.

### 2.3.1 Установка лопатки в фиксирующее устройство

Лопатка устанавливается в фиксирующее устройство помещением хвостовика (1) в паз держателя (2) лопатки (см. Рисунок 2.3). Затем, лопатка надежно фиксируется в держателе относительно упора базового торца (3) и перемещения пластины (4) с помощью винта (5).

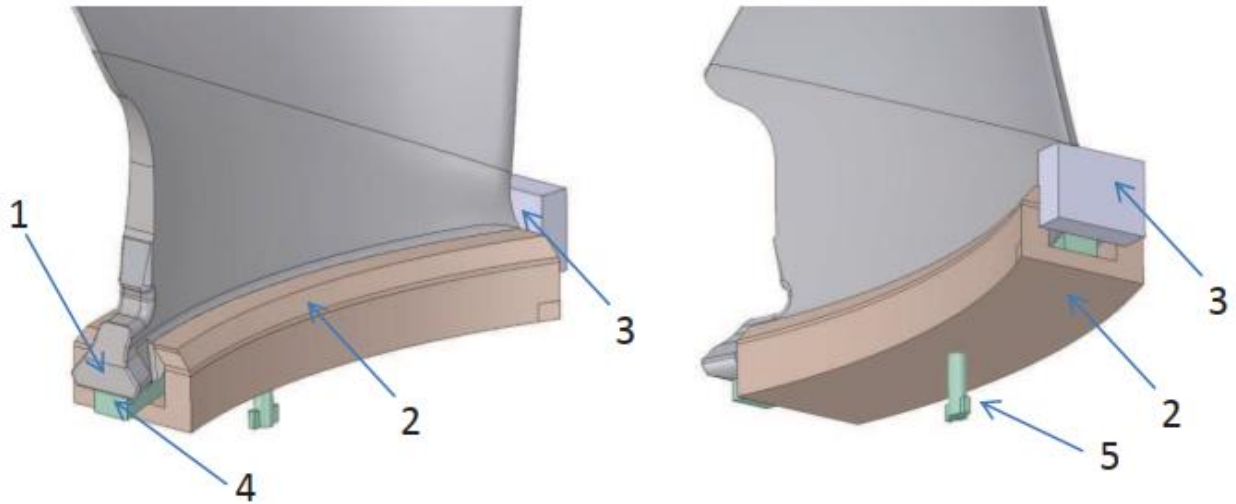


Рисунок 2.3 – Установка лопатки в фиксирующее устройство

Приспособление с лопаткой устанавливается на столе КИМ вдоль траверсы, на которой закреплена измерительная головка.

### 2.3.2 Припасовка положения лопатки относительно системы координат КИМ

Процедура начальной припасовки положения лопатки применяется для исключения систематической погрешности установки пера лопатки, которое с силу большой длины относительно замка не может быть установлено в фиксирующем устройстве без погрешности.

На рисунке 2.4 изображены две плоскости ласточкина хвоста лопатки вентилятора и координатные плоскости, которые они определяют. Две плоскости ласточкина хвоста измеряются индивидуально, но устанавливаются одновременно, чтобы получить плоскость, называемую центральной плоскостью (плоскость ZX). Пересечение двух плоскостей ласточкина хвоста может дать линию, например L на рисунке 2.3. Далее формируется плоскость, параллельная заданной линии и перпендикулярная центральной плоскости; эта плоскость именуется контактной (обозначается как плоскость XY). Тем самым две координатные плоскости определяются на основе поверхностей «ласточкин хвост». Третья опорная плоскость – обозначенная на рисунке 2.4 как плоскость A – определяется в ходе последующих измерений, что обеспечивает полное задание пространственной системы координат.

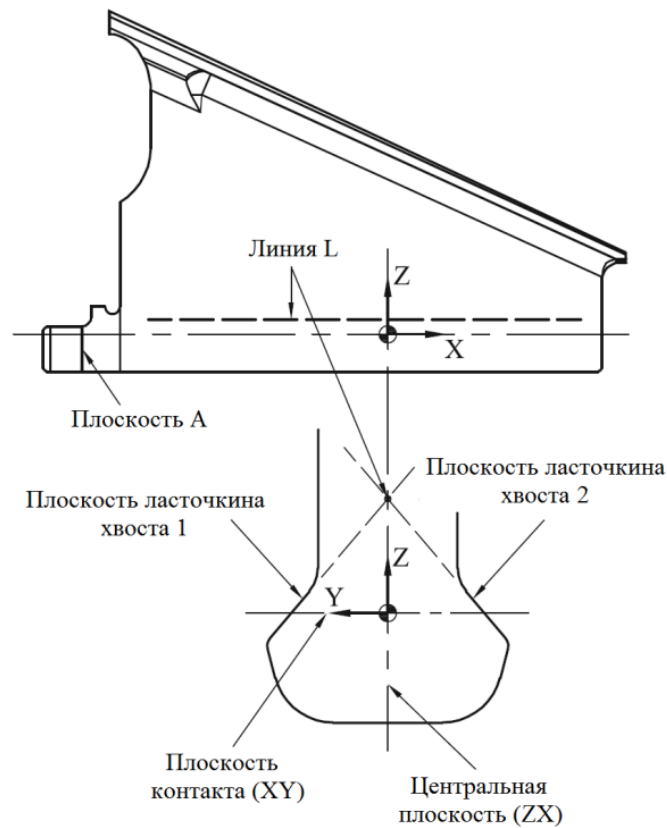


Рисунок 2.4 – Типичные плоскости замка «ласточкин хвост» лопатки вентилятора

### 2.3.3 Обмер установленных сечений лопатки

Каждое сечение рабочей лопатки вентилятора условно разделено на четыре участка: спинку, корыто, входную и выходную кромки. Для обеспечения точности измерений и исключения возможных погрешностей, каждому участку присваивается собственная ориентация зонда измерительной головки. Перед переходом к следующему участку измерительный зонд необходимо переориентировать. Таким образом, для замкнутого контура, включающего четыре участка, в каждом сечении лопатки применяются четыре различных ориентации зонда. При этом каждое сечение имеет индивидуальную настройку ориентации. Все измерительные траектории для различных сечений объединены в единый измерительный цикл, что позволяет выполнить полный цикл измерений за одну установку детали. Результаты измерений всех точек автоматически записываются в файл данных.

Контроль геометрических параметров профиля пера рабочей лопатки выполняется с использованием КИМ COORD3 HERA NT в следующей последовательности:

**Измерения со стороны корыта.** На рисунке 2.5 (а, б) представлена модель лопатки с заданной системой координат. Измерения начинаются с поверхности корыта:

- в каждом из заранее определенных сечений проводится 30 измерений вдоль профиля корыта при постоянной высоте пера лопатки. Точки измерения равномерно распределены по длине профиля;

- измерения выполняются в сечениях: 06, 08, 10, 15, ..., 90 (всего 20 сечений);

– дополнительно в сечении 95 проводится 15 измерений – от центра профиля к его кромке.

**Измерения со стороны спинки.** После завершения измерений корыта осуществляется переход к измерению спинки с соответствующей переориентацией зонда. При этом:

– точка 1 на спинке в каждом из сечений 06-90 расположена напротив точки 30 на корыте (по хорде профиля);

– в сечении 95 точка 1 на спинке соответствует точке 1 на корыте.

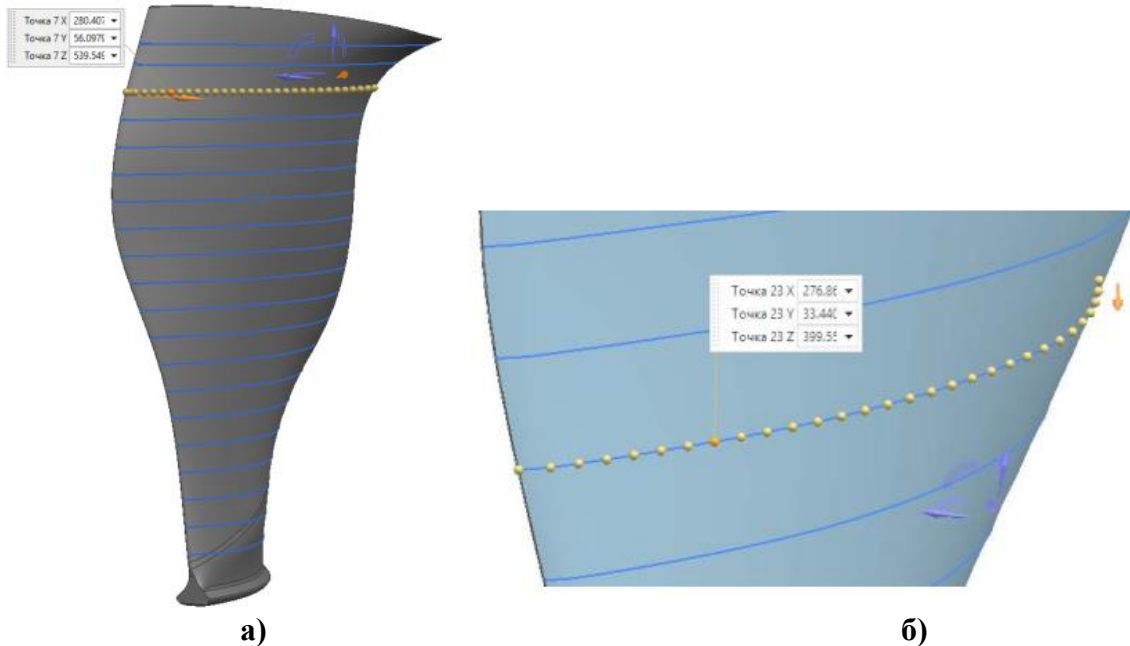


Рисунок 2.5 – Обмер установленных сечений лопатки вентилятора  
(а – положение измеряемых сечений; б – положение измеряемых точек сечений)

В результате измерений с помощью КИМ формируется набор координат номинальных точек (X, Y, Z), расположенных на линиях корыта и спинки профиля. Общее количество измеряемых точек составляет:

- по 30 точек на спинке и корыте в 20 сечениях (сечения 04-90) – 1200 точек;
- по 15 точек на спинке и корыте в сечении 95 – 30 точек.

Итого: 1230 точек.

Контрольно-измерительные мероприятия выполняются для полного комплекта рабочих лопаток вентилятора, предназначенных для сборки вентиляторной ступени, обеспечивая полный контроль геометрии профиля и соответствие заданным техническим требованиям.

**Дополнительные измерения.** Контроль геометрии лопатки не ограничивается общим сканированием на КИМ. Для уточнения формы пера и минимизации погрешностей реконструкции поверхности выполняется цикл дополнительных измерений критических размеров. В их число входят:

- геометрическая высота пера;
- радиусы сопряжения входной и выходной кромок, влияющие на обтекаемость;

- линейные размеры хорд и полухорд в контрольных сечениях;
- толщины профиля в точках  $e_1$ – $e_4$ , измеряемые в сечениях, расположенных на относительной высоте от 15% до 90%.

Координаты контрольных точек и допуски на измеряемые параметры строго определены в конструкторской документации, что позволяет сопоставить фактическую геометрию с теоретическим чертежом.

### 2.3.4 Припасовка измеренных сечений лопатки к номинальной геометрии

Для разделения погрешности формы профиля от погрешностей положения (выноса и разворота сечения) выполняется припасовка (алгоритмическое совмещение) измеренного сечения с номинальным для каждого сечения в диапазоне 04...95. Припасовка проводится одновременно по линиям профиля спинки и корыта.

Ниже описан алгоритм наилучшего приближения, применяемый для этой цели. Данный алгоритм реализован в программном обеспечении КИМ COORD3 HERA NT и автоматически выполняется по завершении процесса измерения.

Цель алгоритма – минимизировать среднеквадратичное отклонение между измеренными точками и номинальным контуром за счет оптимального пространственного преобразования измеренного профиля. Задача формулируется следующим образом:

Пусть:

- $p_i$  – измеренные точки;
- $q_i$  – соответствующие им точки на номинальной кривой;
- $e_i$  – вектор расстояния между  $p_i$  и  $q_i$ .

Их взаимоотношение определяется координатным преобразованием (2.1):

$$p_i = T(q_i + e_i) \quad (2.1)$$

где  $T$  — матрица преобразования координат (включающая смещение, поворот и, при необходимости, масштабирование).

Поскольку как матрица  $T$ , так и точки  $q_i$  изначально неизвестны, задача решается методом итерационной оптимизации с минимизацией целевой функции – суммы квадратов расстояний между измеренными и номинальными точками.

Целевая функция определяется как (2.2):

$$F = \sum_{i=1}^n |T^{-1}p_i - q_i|^2 \quad (2.2)$$

Минимум целевой функции (2.3):

$$\min F = \min \sum_{i=1}^n e_i^T e_i \quad (2.3)$$

Среднеквадратическая ошибка (2.4):

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^T e_i} \quad (2.4)$$

Далее задача минимизации разбивается на две взаимосвязанные фазы, выполняемые итерационно:

1. Поиск ближайших точек на номинальной кривой (при фиксированной матрице  $T$ ).

На данном этапе предполагается, что преобразование  $T$  известно. Задача сводится к определению точек  $q_i$  на номинальной кривой, ближайших к преобразованным измеренным точкам  $T^{-1}(p_i)$ .

Номинальный профиль моделируется с помощью NURBS-кривой (Non-Uniform Rational B-Spline), заданной порядком, узловым вектором, контрольными точками и их весами. Каждая точка на кривой определяется параметрической координатой  $u_i \in [0, 1]$ .

Таким образом, поиск  $q_i$  эквивалентен определению параметрических значений  $u_i$ , при которых расстояние от  $T^{-1}(p_i)$  до кривой минимально. Это достигается численной оптимизацией параметров  $u_i$  для каждой измеренной точки.

2. Вычисление матрицы преобразования  $T$  (при фиксированных  $q_i$ )

На втором этапе, при зафиксированных соответствиях  $p_i$  и  $q_i$ , вычисляется оптимальная матрица преобразования  $T$ , минимизирующая сумму квадратов отклонений. Для решения этой задачи используется метод сингулярного разложения (SVD), обеспечивающий устойчивое и точное определение параметров смещения и поворота.

Указанные две фазы выполняются в цикле до сходимости:

1. На основе текущего преобразования  $T$  находятся ближайшие точки  $q_i$  на номинальной кривой.

2. По парам  $(p_i, q_i)$  пересчитывается матрица  $T$  методом SVD.

3. Вычисляется среднеквадратичная ошибка (RMS) текущего приближения.

4. Итерации продолжаются до тех пор, пока изменение RMS между соседними итерациями не станет меньше заданного порога.

По завершении итерационного процесса для каждого сечения определяются:

1. Отклонение выноса – линейное смещение сечения относительно номинала.

2. Отклонение разворота – угловое отклонение сечения.

3. Отклонение формы профиля – локальные отклонения в каждой измеренной точке после компенсации смещения и поворота.

Допуски на каждый тип отклонения формулируются отдельно, притом наиболее жесткие требования применяют к отклонениям формы профиля. Допуски подразделяются на допуски по смещению профиля в плоскости сечения, поворот профиля вокруг центра тяжести  $d_a$  и локальное отклонение профиля от номинальной формы  $d_s$  (см. Рисунок 2.6).

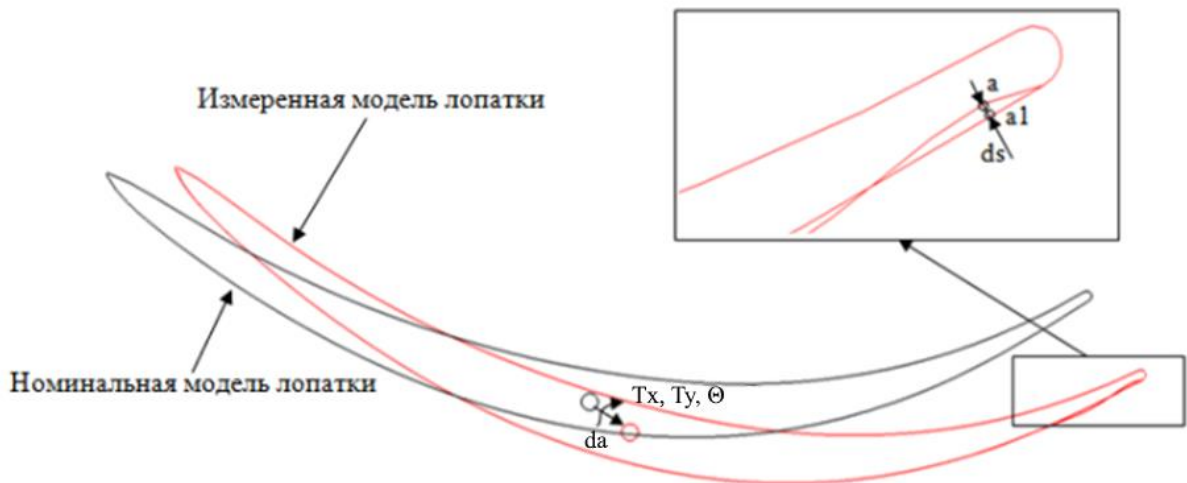


Рисунок 2.6 – Отклонения измеренного профиля лопатки от номинальной модели после припасовки

Таким образом, алгоритм позволяет разделить геометрические погрешности на составляющие, связанные с положением сечения, и погрешности, обусловленные отклонением формы профиля.

### 2.3.5 Результаты контрольно-измерительных мероприятий лопатки

Обработка результатов контрольно-измерительных мероприятий рабочих лопаток вентилятора выполняется на основании нормативных документов [106, 107], с целью определения основных геометрических параметров, необходимых для проверки соответствия геометрии изготовленной лопатки производственным допускам.

На рисунке 2.7 схематично представлены данные контрольно-измерительных операций по обмеру пера лопатки вентилятора.

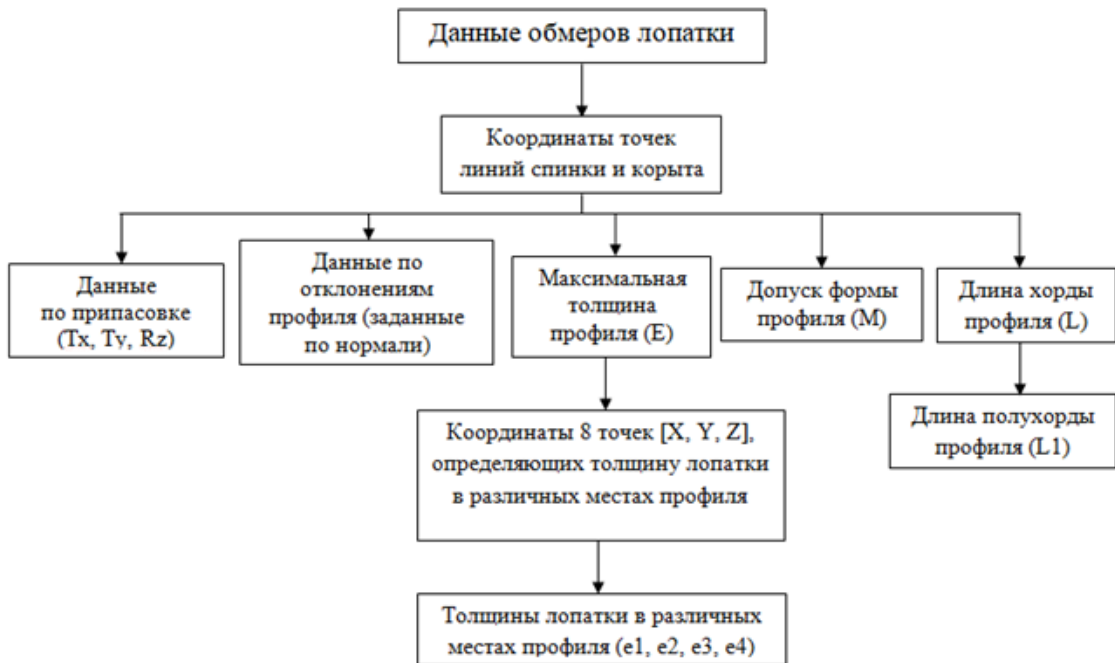


Рисунок 2.7 – Данные контрольно-измерительных операций

Процесс обработки данных, полученных с КИМ, состоит из нескольких этапов:

1. Расчет геометрических параметров, определяющих на какую величину сместилось измеренное сечение относительно номинального:

- отклонения центра тяжести [Tx, Ty];
- отклонения угла установки [Θ].

Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий для параметров, определяющих на какую величину сместилось измеренное сечение относительно номинального изображен на рисунке 2.8.

База	Номинал	Текущий	Доп-	Доп+	Откл.	Тенденция
04	Данные базирования Между СКД4 And СКД_04 (БАЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ)					
	Tx	0.000	-0.113	-0.600	0.600	-0.113
	Ty	0.000	0.161	-0.600	0.600	0.161
	Rz	0°0'00"	0°2'44"	-0°30'00"	0°30'00"	0°2'44"
06	Данные базирования Между СКД4 And СКД_06 (БАЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ)					
	Tx	0.000	-0.201	-0.400	0.400	-0.201
	Ty	0.000	0.136	-0.400	0.400	0.136
	Rz	0°0'00"	0°1'37"	-0°30'00"	0°30'00"	0°1'37"
08	Данные базирования Между СКД4 And СКД_08 (БАЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ)					
	Tx	0.000	-0.280	-0.400	0.400	-0.280
	Ty	0.000	0.104	-0.400	0.400	0.104
	Rz	0°0'00"	-0°1'04"	-0°30'00"	0°30'00"	-0°1'04"
10	Данные базирования Между СКД4 And СКД_10 (БАЗИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЕ СОВМЕЩЕНИЕ)					
	Tx	0.000	-0.214	-0.400	0.400	-0.214
	Ty	0.000	0.088	-0.400	0.400	0.088
	Rz	0°0'00"	0°0'08"	-0°30'00"	0°30'00"	0°0'08"

Рисунок 2.8 – Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий лопаток по припасовке

2. Расчет отклонений профиля по нормали [ΔX, ΔY, ΔZ] для 20 сечений по 30 точкам, лежащих на линиях спинки и корыта, и по 15 точкам на спинке и корыте для сечения 95.

Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий для отклонений профиля пера лопатки изображен на рисунке 2.9.

База:	НОМИНАЛ	Текущий	Доп-	Доп+	Откл.	Тенденция
S_04K.1	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.110	-0.250	0.250	0.110	
S_04K.2	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.149	-0.250	0.250	0.149	
S_04K.3	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.138	-0.250	0.250	0.138	
S_04K.4	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.142	-0.250	0.250	0.142	
S_04K.5	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.157	-0.250	0.250	0.157	
S_04K.6	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.177	-0.250	0.250	0.177	
S_04K.7	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.200	-0.250	0.250	0.200	
S_04K.8	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.223	-0.250	0.250	0.223	
S_04K.9	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.221	-0.250	0.250	0.221	
S_04K.10	Поверх. Точ. По Поверхность 3751 Норм. Откл. 0.000	0.206	-0.250	0.250	0.206	

Рисунок 2.9 – Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий лопаток по отклонениям

3. Расчет остальных геометрических параметров, определяющих форму профиля рабочей лопатки вентилятора:

- толщины лопатки в различных местах профиля [e1, e2, e3, e4];
- максимальная толщина профиля в сечении [E];
- длина хорды профиля [L].

Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий для толщин лопатки в различных местах профиля, а также длины хорды изображен на рисунке 2.10 (а, б).

База:	НОМИНАЛ	Текущий	Доп-	Доп+	Откл.	Тенденция	Сечения	L	
								по чертежу	действ.
E2_15	Дистанция E2_15K - E2_15S / E2_15 У1 1.878	1.735	-0.300	0.300	-0.144		15	174,022	-0,55
E4_15	Дистанция E4_15K - E4_15S / E4_15 У1 3.428	3.428	-0.300	0.300	-0.033				
E3_15	Дистанция E3_15K - E3_15S / E3_15 У1 5.287	5.287	-0.250	0.350	-0.007		20	177,925	-0,55
E1_15	Дистанция E1_15K - E1_15S / E1_15 У1 2.548	2.373	-0.250	0.350	-0.175				
E2_20	Дистанция E2_20K - E2_20S / E2_20 У1 1.878	1.532	-0.300	0.300	-0.138		25	183,333	THEO
E4_20	Дистанция E4_20K - E4_20S / E4_20 У1 3.028	3.000	-0.300	0.300	-0.052				
E3_20	Дистанция E3_20K - E3_20S / E3_20 У1 4.888	4.881	-0.250	0.350	-0.008		30	189,609	-0,55
E1_20	Дистанция E1_20K - E1_20S / E1_20 У1 2.398	2.158	-0.250	0.350	-0.142				
E2_25	Дистанция E2_25K - E2_25S / E2_25 У1 1.542	1.433	-0.300	0.300	-0.109		04	+ 0,75	
E4_25	Дистанция E4_25K - E4_25S / E4_25 У1 2.742	2.708	-0.300	0.300	-0.034				
E3_25	Дистанция E3_25K - E3_25S / E3_25 У1 4.207	4.238	-0.250	0.350	0.030		06...10	+ 0,75	
E1_25	Дистанция E1_25K - E1_25S / E1_25 У1 2.084	1.938	-0.250	0.350	-0.145				
E2_30	Дистанция E2_30K - E2_30S / E2_30 У1 1.828	1.480	-0.300	0.300	-0.102		15...95	+ 0,75	
E4_30	Дистанция E4_30K - E4_30S / E4_30 У1 2.998	2.621	-0.300	0.300	-0.072				
E3_30	Дистанция E3_30K - E3_30S / E3_30 У1 3.887	3.878	-0.250	0.100	-0.011		30	+ 0,75	
E1_30	Дистанция E1_30K - E1_30S / E1_30 У1 1.814	1.825	-0.250	0.100	-0.089				

Рисунок 2.10 – Пример формата представления результатов контрольно-измерительных мероприятий лопаток (а – по толщинам лопатки в различных местах профиля; б – длинам хорды)

Далее представлены данные о точности измерений, полученные в ходе проведения контрольно-измерительных мероприятий (не менее 3-х измерений):

1. Допуск, для центра окружности, проходящей, через образующие замка – 3...4 мкм.
2. Погрешность при установке:
  - сечение 04 – 0,012 мм;
  - сечения 06...10 – 0,005 мм;
  - сечения 15...95 – 0,018 мм.

3. Расхождение величины  $E$ :
  - сечения 04...10 – 0,004 мм;
  - сечения 15...95 – 0,006 мм.
4. Расхождение значений смещения по оси  $X$  – 0,020...0,058 мм.
5. Расхождение значений смещения по оси  $Y$  – 0,008...0,058 мм.
6. Расхождение величин разворота сечений – 0,017°.
7. Расхождение толщины  $e_2$  и  $e_4$  в сечениях 17...95 – 0,012 мм.
8. Расхождение толщины  $e_1$  и  $e_3$  в сечениях 15...25 – 0,019 мм.
9. Расхождение толщины  $e_1$  и  $e_3$  в сечениях 30...90 – 0,014 мм.
10. Расхождение допуска формы профиля  $M$ :
  - сечение 04 – 0,002 мм;
  - сечения 06...10 – 0,005 мм;
  - сечения 15...95 – 0,018 мм.

#### 2.4 Построение вероятностных параметров профиля пера лопаток вентилятора

Оценка вероятностных характеристик геометрии профиля лопаток вентилятора выполнена на основе статистического анализа измерений, проведенных на опытной партии рабочих лопаток. Данная часть работы была выполнена под руководством доктора технических наук, главного специалиста по перспективным разработкам «ОКБ им. А. Льюльки» – филиал ПАО «ОДК-УМПО» Г.В. Кретинина.

К измеренным геометрическим параметрам, используемым в данных исследованиях, относятся величины:  $E$  (максимальная толщина профиля в сечении);  $\Theta$  (угол установки сечения);  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ,  $e_4$  (толщины лопатки в различных местах профиля). Схематично данные параметры представлены на рисунке 2.11.

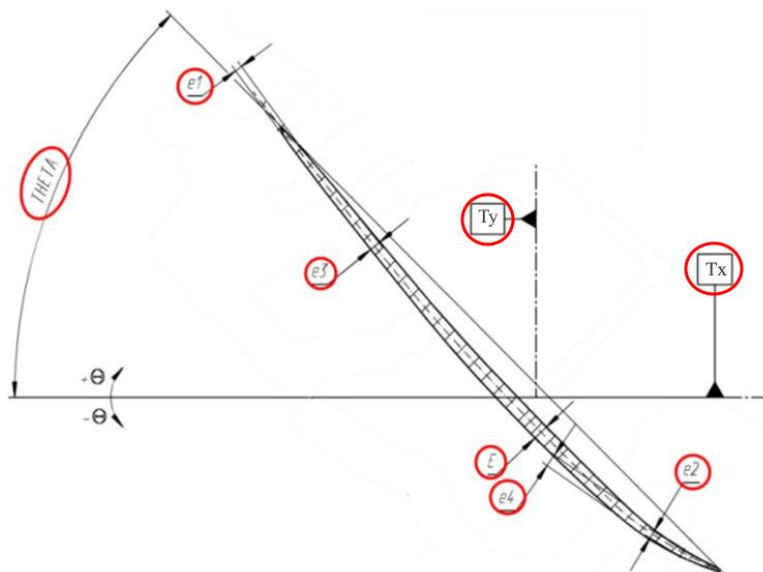


Рисунок 2.11 – Параметры, используемые в статистических исследованиях

Достоверность любых статистических оценок в значительной степени зависит от объема исследуемой выборки. На момент проведения данных исследований были получены данные контрольно-измерительных мероприятий по 15 лопаткам исследовательской партии. Такого количества явно недостаточно для проведения полноценного вероятностного анализа. Поэтому при проведении данной работы был принят подход, в соответствии с которым данные, полученные для исследовательской партии рабочих лопаток («новая» выборка), сравнивались с результатами контрольно-измерительных мероприятий по 1752 лопаткам, произведенным ранее, а именно в 2012 году («старая» выборка). При проведении анализа оценивались законы распределения рассматриваемых величин (по частотным гистограммам), определялись значения математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений, оценивались диапазоны изменения измеряемых величин с вероятностью 95% (при предположении о нормальности законов распределения), а также проводился корреляционный анализ основных параметров.

Контрольные сечения лопатки с указанием соответствующих радиусов, для которых осуществлялись измерения параметров, показаны на рисунке 2.12. В наиболее полном объеме вероятностный анализ проводился для сечений 15...90.

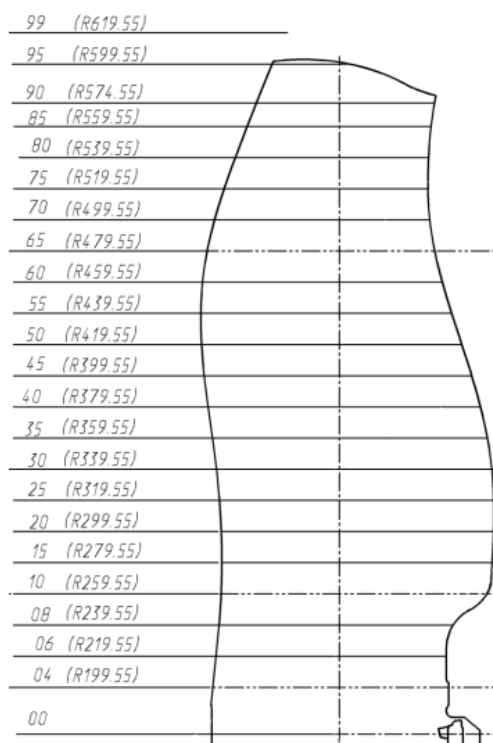


Рисунок 2.12 – Контрольные сечения лопатки вентилятора

#### 2.4.1 Вероятностный анализ максимальной толщины профиля (E)

В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений максимальной толщины профиля от номинальных значений ( $d_E$ ). На рисунке 2.13 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_E$  для «старой» и «новой» выборок, а также

границы допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.14 приведены диапазоны, в которые максимальная толщина профиля попадает с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

Анализ этих результатов показывает, что характер изменения по радиусу отклонений максимальной толщины профиля примерно одинаков для «старой» и «новой» выборок. В обоих случаях наблюдается некоторое отклонение максимальной толщины профиля в большую сторону. В области корневых и средних сечений граница доверительного интервала для «старой» выборки практически совпадает с максимально допустимыми значениями, что говорит о том, что существует примерно 2.5-процентная вероятность нарушения допуска по максимальной толщине профиля. На рисунке 2.15 показано изменение параметра  $d_E$  в 45-м сечении по номерам двигателей («старая» выборка). Видно, что из 1752-х лопаток только одна выходит за рамки допуска, т.е. вероятность нарушения допуска очень мала. Это говорит о том, что имеется некоторое отклонение закона распределения от нормального, которое, правда, может быть вызвано именно отбраковкой лопаток, не попавших в допуск. Для «новой» выборки одна из 15 лопаток (293197-2) также имеет отклонения, превышающие правую границу допуска.

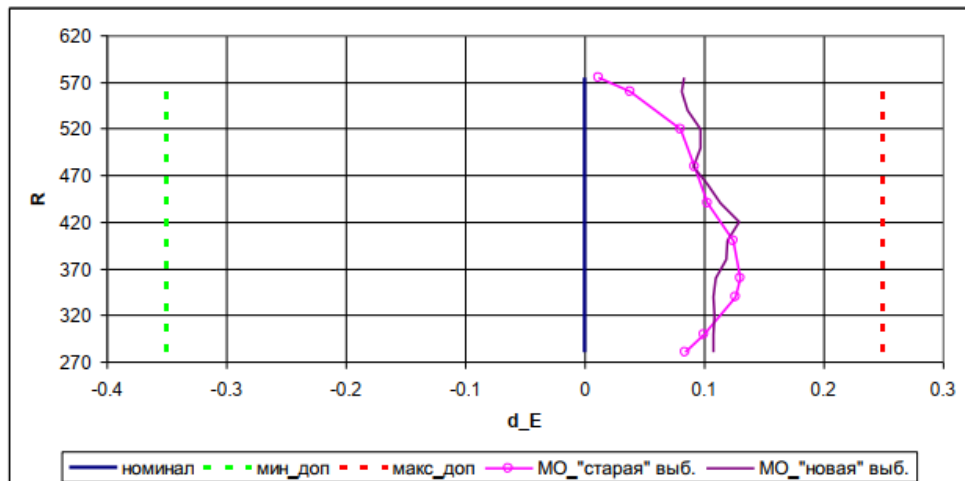


Рисунок 2.13 – Математическое ожидание величины  $d_E$

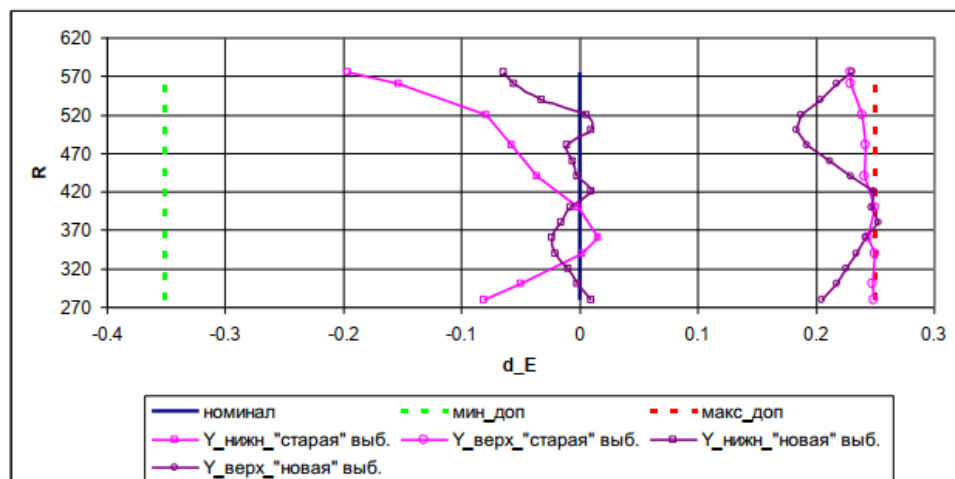


Рисунок 2.14 – Доверительные интервалы величины  $d_E$

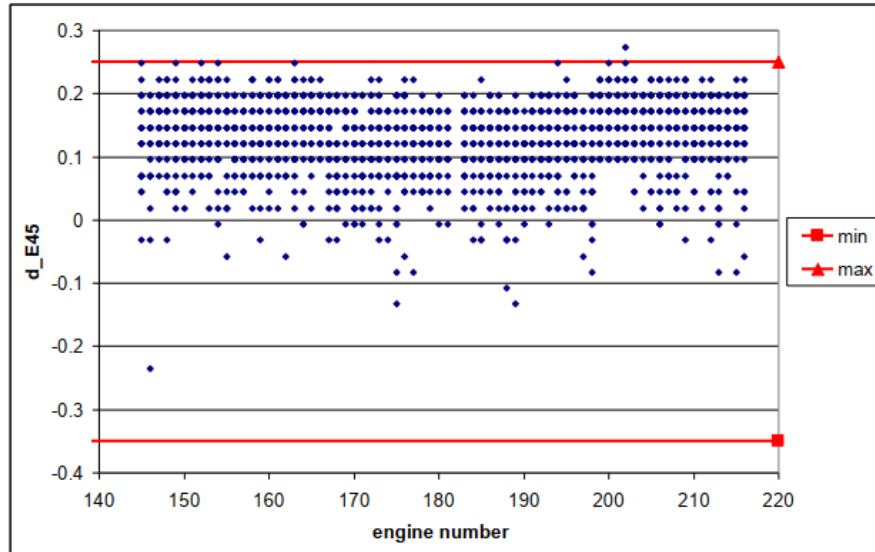


Рисунок 2.15 – Изменение параметра  $d_E$  в 45-м сечении по номерам двигателей

На рисунках 2.16-2.18 приведены частотные гистограммы отклонений максимальной толщины профиля для трех сечений по высоте лопатки. Видно, что незначительные отклонения от нормальности закона распределения для «старой» выборки имеют место для корневых и средних сечений, т.е. именно там, где правая граница доверительного интервала совпадает с правой границей допуска. Это косвенно подтверждает гипотезу о том, что лопатки, не попадающие в поле допусков, отбраковываются (или дорабатываются), что ведет к некоторой деформации закона распределения. Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид закона распределения, однако, в целом, существенные различия возможны только для периферийных сечений.

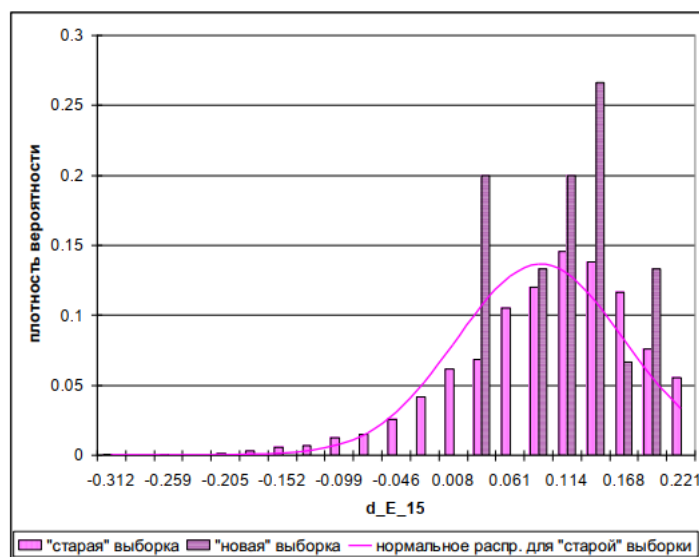
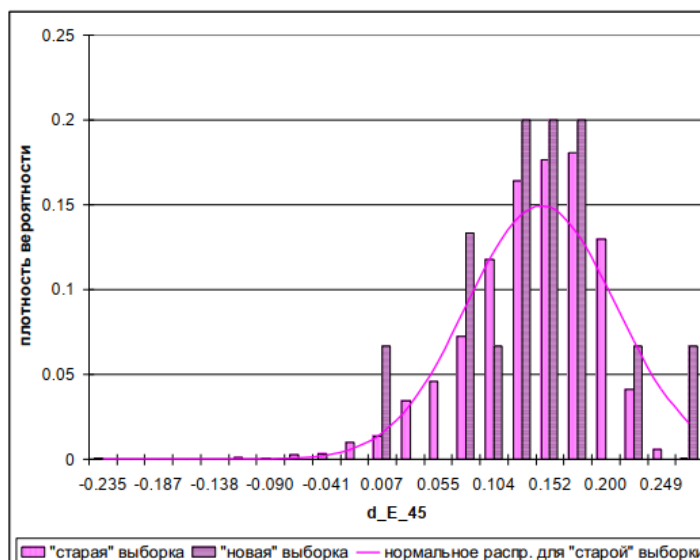
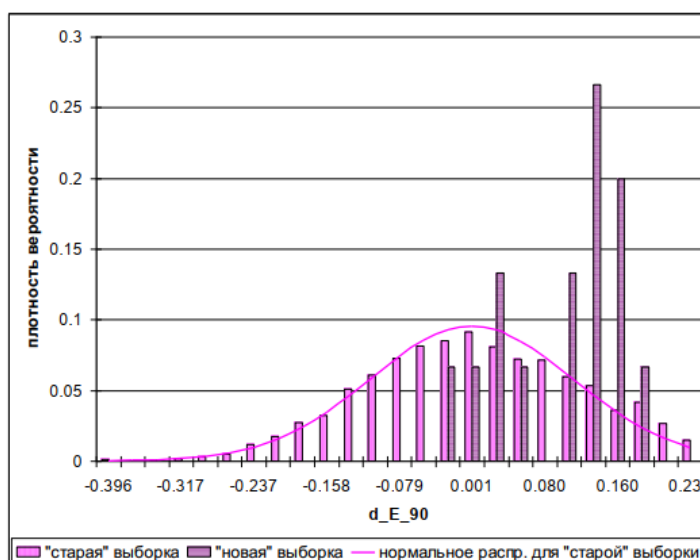


Рисунок 2.16 – Частотные гистограммы величины  $d_E$  для 15-го сечения

Рисунок 2.17 – Частотные гистограммы величины  $d_E$  для 45-го сеченияРисунок 2.18 – Частотные гистограммы величины  $d_E$  для 90-го сечения

На рисунках 2.19 и 2.20 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона максимальной толщины профиля с другими измеряемыми параметрами для рассматриваемых сечений. Критическое значение коэффициента корреляции для уровня значимости 0,005 применительно к «старой» выборке составляет величину 0,21, а применительно к «новой» выборке – 0,64.

Видно, что наиболее значимой корреляцией как для «старой», так и для «новой» выборок является корреляция E-e4. Для «старой» выборки значимыми также являются корреляции E-e3 и E-e2 (за исключением периферийных сечений). Этот результат является вполне логичным (чем ближе по профилю лопатки измеряются параметры, тем выше корреляция). Неочевидным является протекание корреляции E-e3 для «новой» выборки. Она является значимой для корневых сечений и практически отсутствует для средних сечений.

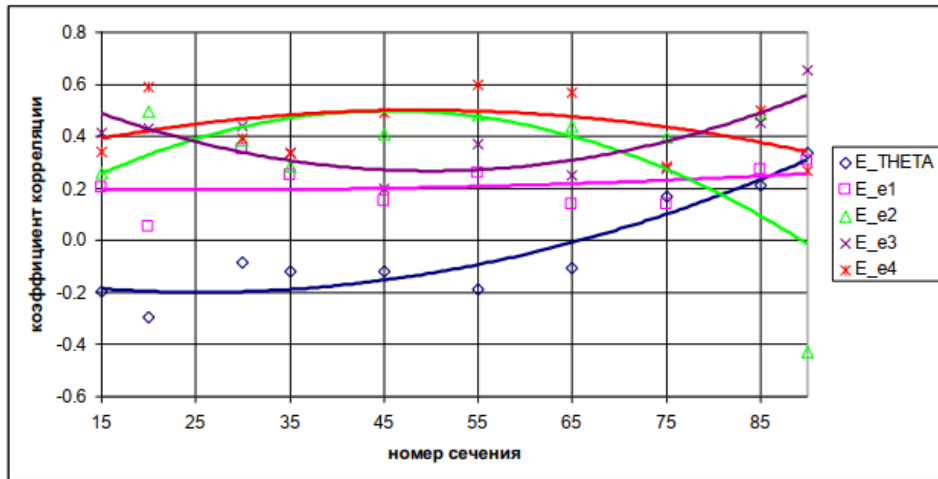


Рисунок 2.19 – Коэффициенты корреляции E для «старой» выборки

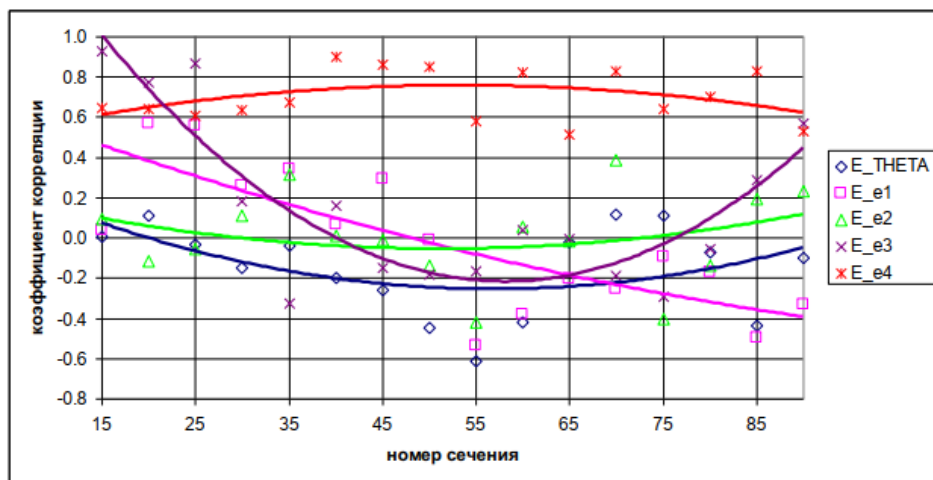


Рисунок 2.20 – Коэффициенты корреляции E для «новой» выборки

Примеры связи параметров E-e4 и E-e3 применительно к «старой» выборке для сечения 55 приведены на рисунках 2.21 и 2.22.

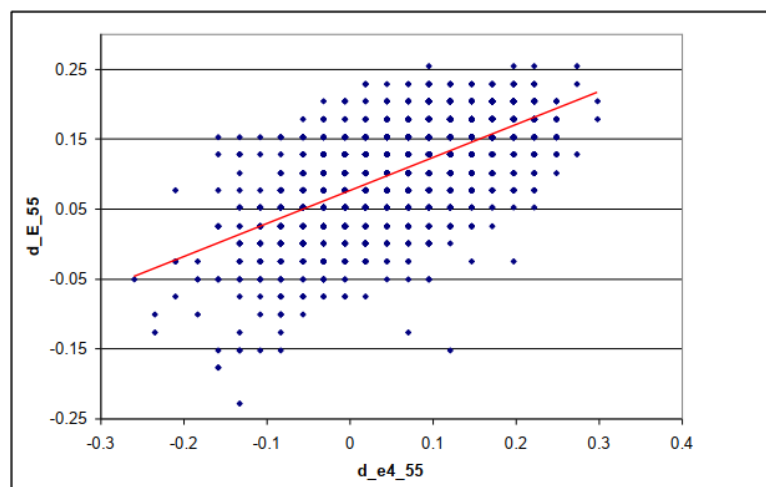


Рисунок 2.21 – Иллюстрация корреляции E-e4

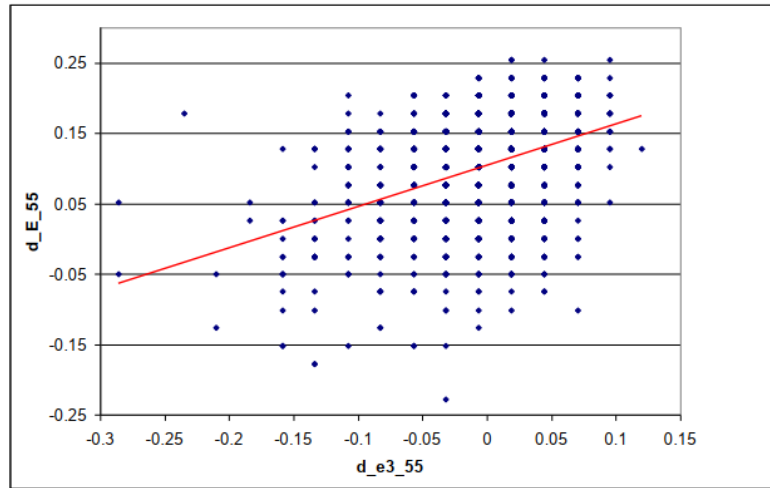
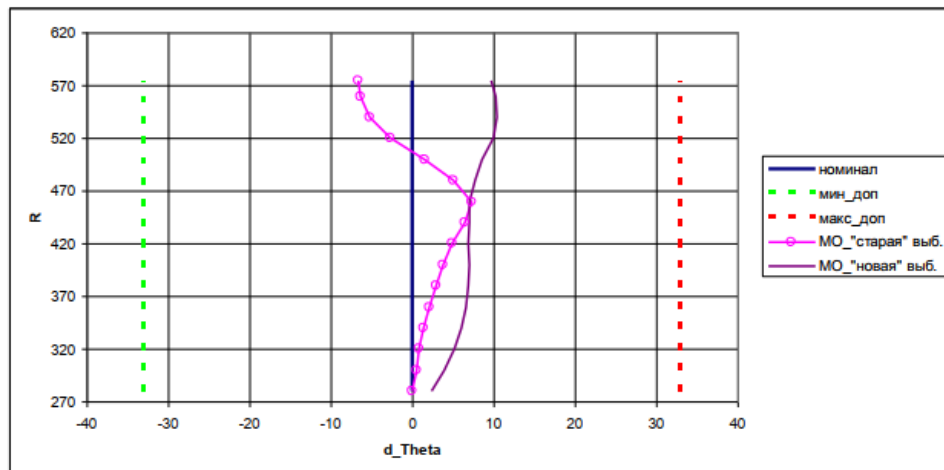


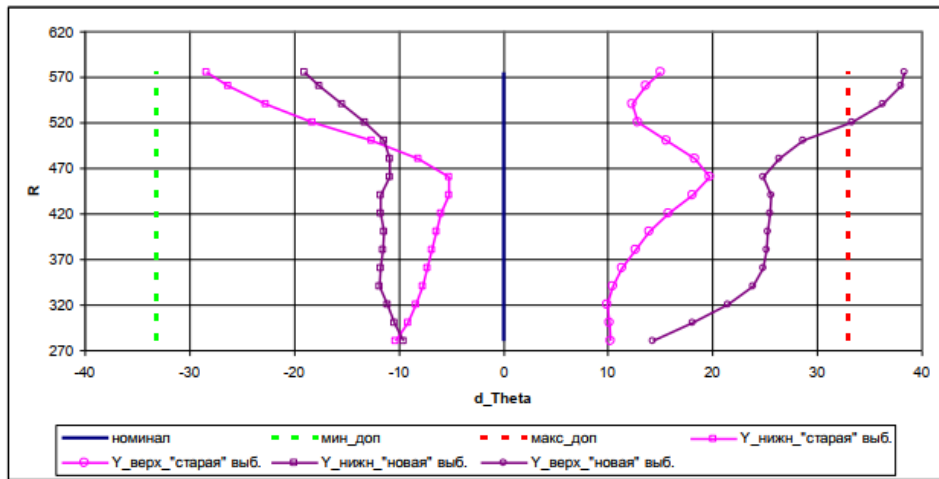
Рисунок 2.22 – Иллюстрация корреляции E-e3

### 2.4.2 Вероятностный анализ угла установки сечения ( $\Theta$ )

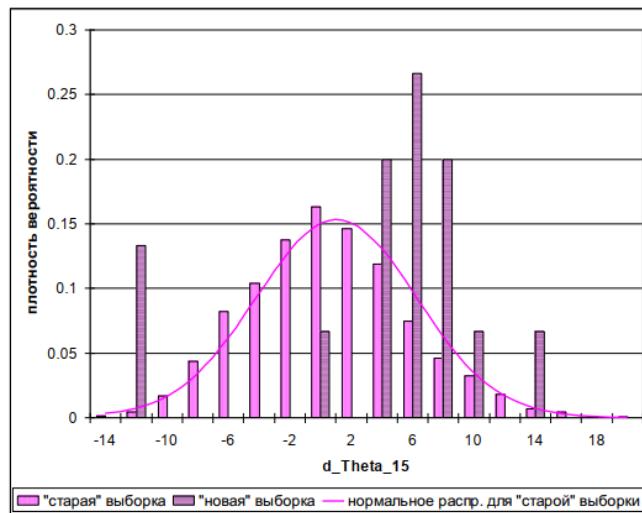
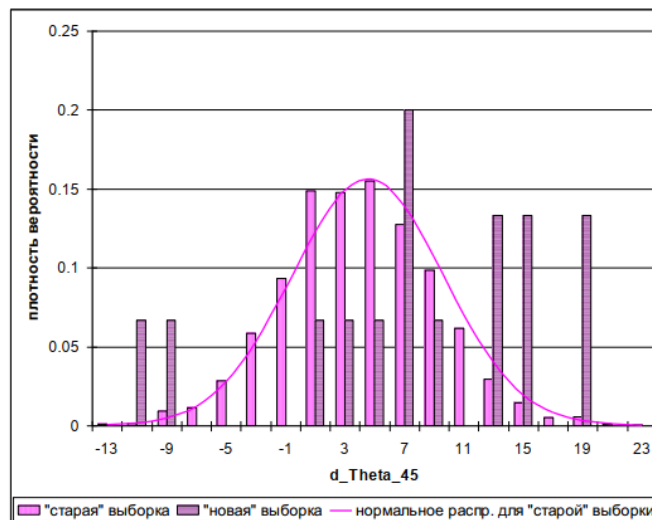
В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений угла установки сечения от номинальных значений ( $d_\Theta$ ). На рисунке 2.23 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_\Theta$  для «старой» и «новой» выборок, а также границы допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.24 приведены диапазоны, в которые отклонения угла установки попадают с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

Анализ этих результатов показывает, что характер изменения по радиусу отклонений угла установки профиля несколько отличается для «старой» и «новой» выборок. В частности, для периферийных сечений различие значений математических ожиданий отклонения угла установки достигает  $17'$ . В области периферийных сечений граница доверительного интервала для «новой» выборки превышает максимально допустимую величину, что говорит о том, что существует более, чем 2,5-процентная вероятность нарушения допуска по углу установки (хотя для исследовательской партии нарушений допуска по углам установки не зафиксировано).

Рисунок 2.23 – Математическое ожидание величины  $d_\Theta$

Рисунок 2.24 – Доверительные интервалы величины  $d_{\Theta}$ 

На рисунках 2.25-2.27 приведены частотные гистограммы отклонений угла установки для трех сечений по высоте лопатки.

Рисунок 2.25 – Частотные гистограммы величины  $d_{\Theta}$  для 15-го сеченияРисунок 2.26 – Частотные гистограммы величины  $d_{\Theta}$  для 45-го сечения

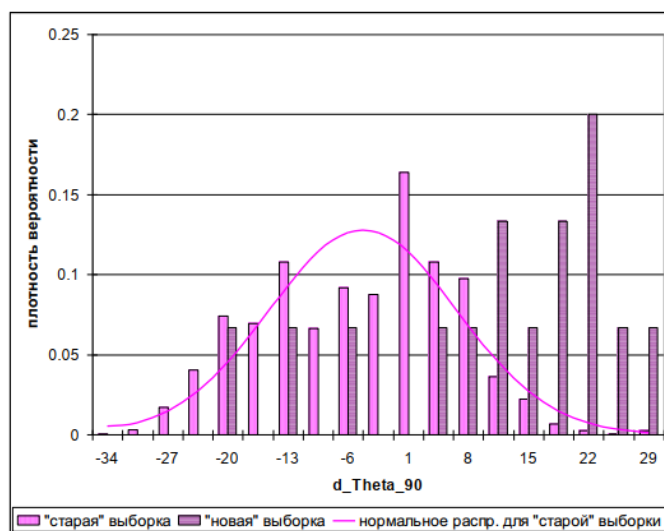


Рисунок 2.27 – Частотные гистограммы величины  $d_{\Theta}$  для 90-го сечения

Видно, что для корневых и средних сечений законы распределения близки к нормальным, а для периферийных сечений, в частности для сечения 90, наблюдаются весьма существенные отличия от нормальности. Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид законов распределения, однако просматриваются некие общие со «старой» выборкой закономерности, в частности существенный рост разброса параметра  $d_{\Theta}$  в периферийных сечениях лопатки (см. Рисунок 2.24).

На рисунках 2.28 и 2.29, в качестве примера, приведено изменение параметра  $d_{\Theta}$  в 45-м и 90-м сечениях по номерам двигателей. Видно, что при производстве лопаток наблюдалось снижение средних значений  $d_{\Theta}$  как для средних, так и особенно, для периферийных сечений.

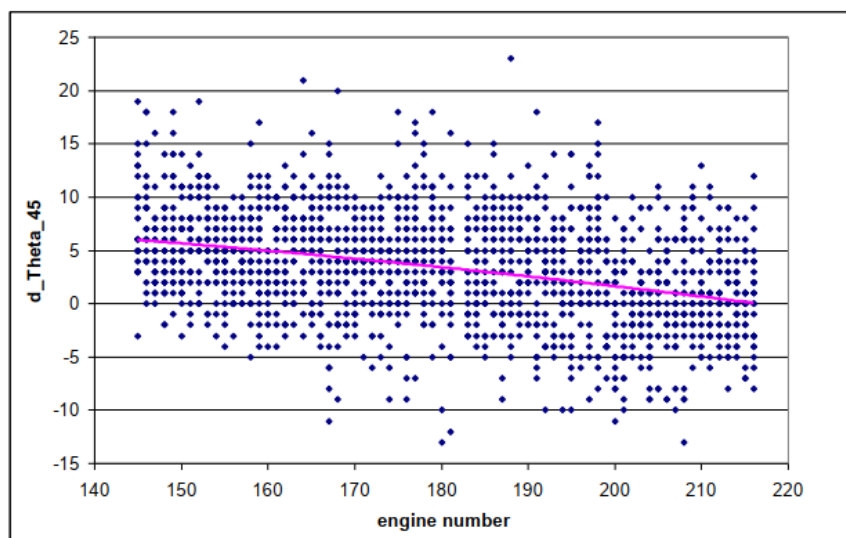


Рисунок 2.28 – Изменение параметра  $d_{\Theta_{45}}$  по номерам двигателей

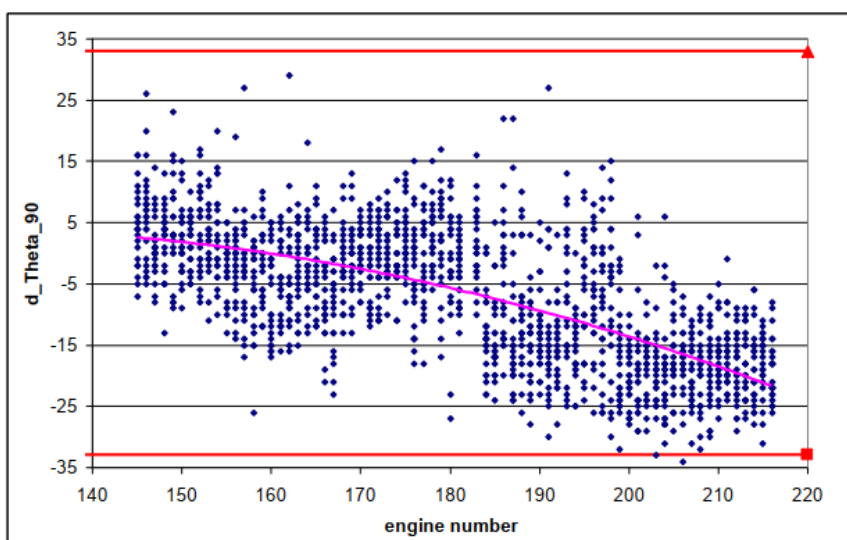


Рисунок 2.29 – Изменение параметра  $d_{\Theta_{90}}$  по номерам двигателей

На рисунках 2.30 и 2.31 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона для угла установки лопатки с другими измеряемыми параметрами рассматриваемых сечений.

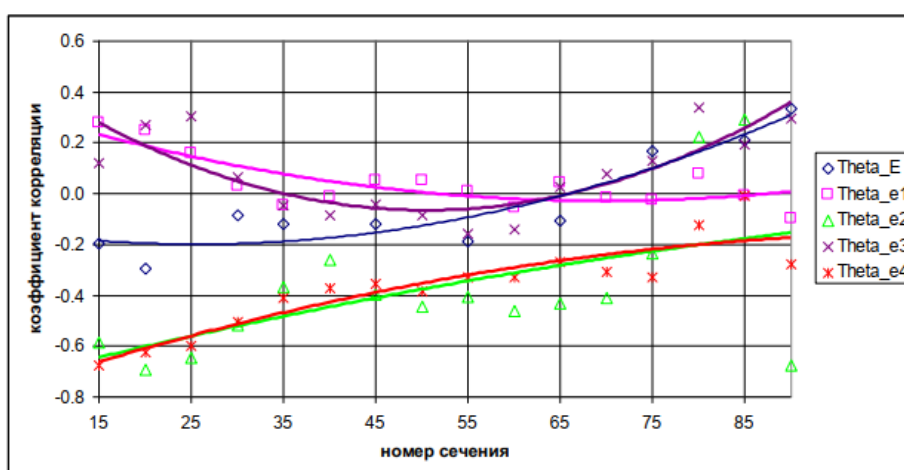


Рисунок 2.30 – Коэффициенты корреляции  $\Theta$  для «старой» выборки

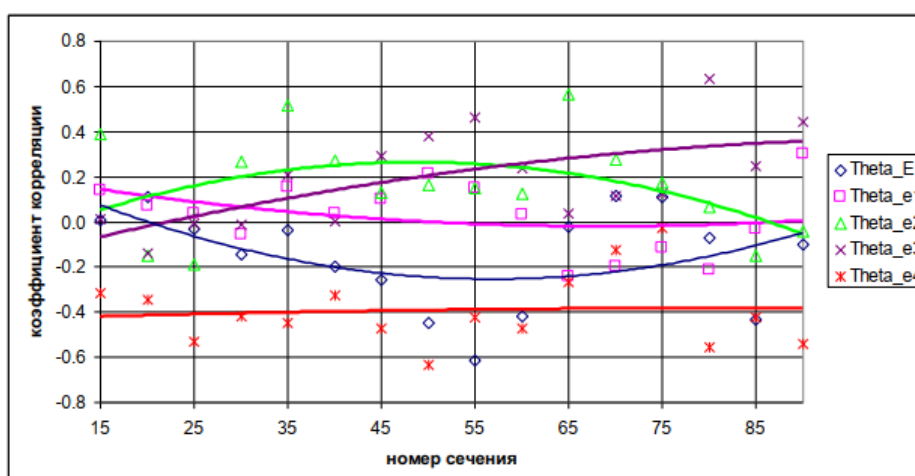


Рисунок 2.31 – Коэффициенты корреляции  $\Theta$  для «новой» выборки

Видно, что для «новой» выборки на принятом уровне значимости 0,005 значимые корреляции  $\Theta$  с другими параметрами отсутствуют. Для «старой» выборки наблюдаются значимые обратные корреляции  $\Theta$ - $e_2$  и  $\Theta$ - $e_4$ . Причины такой ситуации неочевидны, однако отмеченный ранее временной дрейф параметра  $\Theta$  для «старой» выборки может привести к такому результату. На рисунке 2.32 показано изменение параметра  $e_2$  в 45-м сечении по номерам двигателей. Сравнивая этот рисунок с рисунком 2.28, можно заметить наличие временных дрейфов в противоположных направлениях, что может приводить к значимым коэффициентам обратной корреляции.

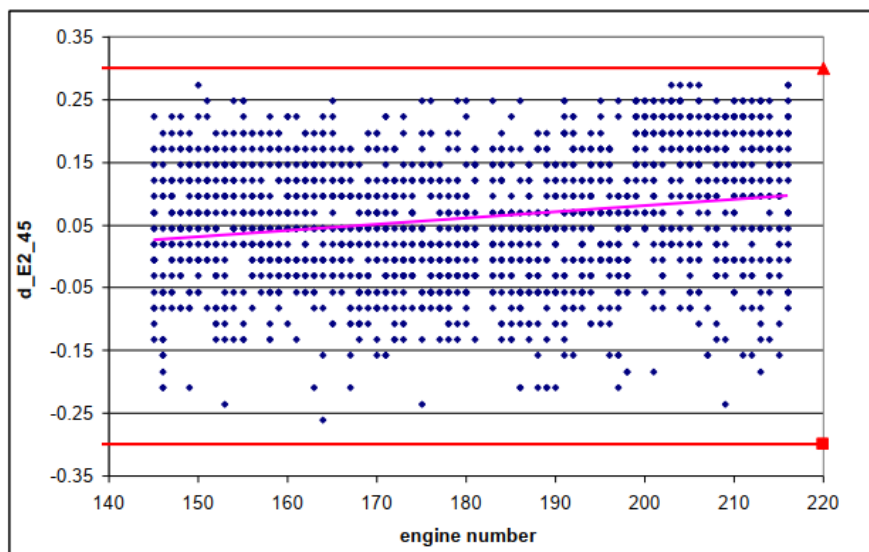
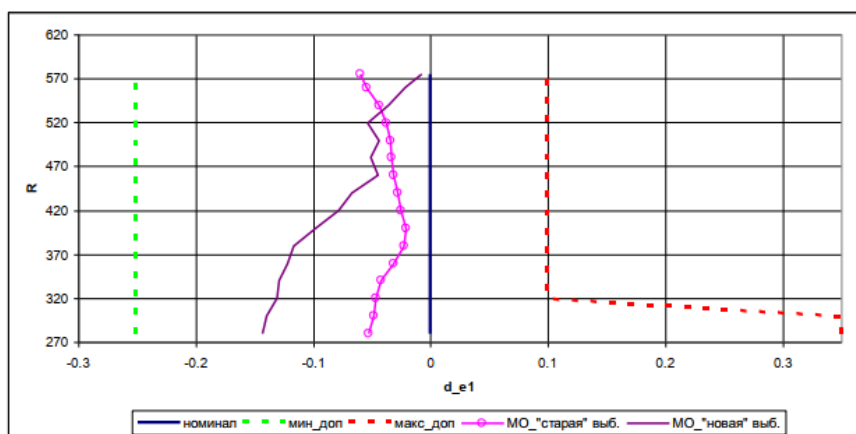
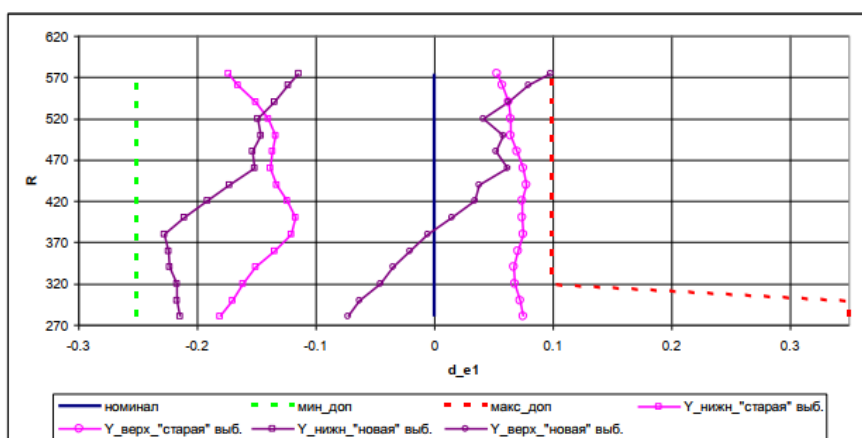


Рисунок 2.32 – Изменение параметра  $d_{e2\_45}$  по номерам двигателей

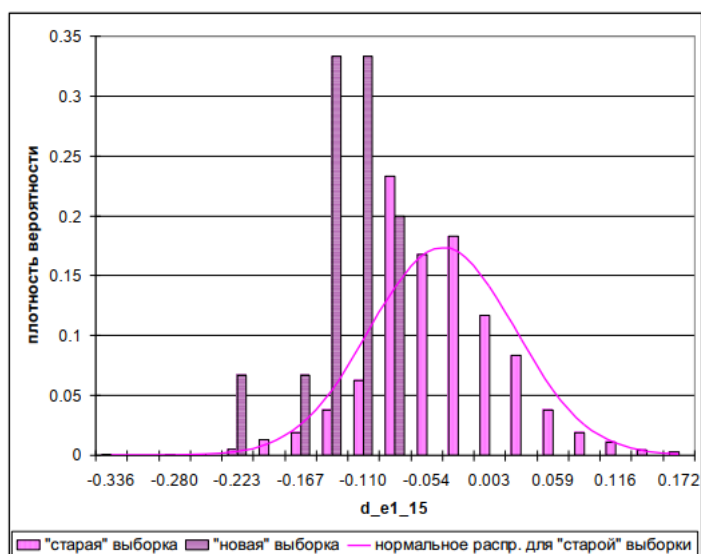
### 2.4.3 Вероятностный анализ толщины лопатки вблизи входной кромки ( $e_1$ )

В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений толщины вблизи входной кромки от номинальных значений ( $d_{e1}$ ). На рисунке 2.33 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_{e1}$  для «старой» и «новой» выборок, а также границы допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.34 приведены диапазоны, в которые отклонения параметра  $e_1$  попадают с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

Анализ этих результатов показывает, что характер изменения по радиусу отклонений толщины профиля вблизи входной кромки незначительно отличается для «старой» и «новой» выборок. В частности, для «новой» выборки наблюдается уменьшение абсолютной величины отклонения параметра  $e_1$  с увеличением радиуса, тогда как для «старой» выборки математическое ожидание  $d_{e1}$  от радиуса практически не зависит. При этом для обеих выборок границы доверительного интервала находятся внутри поля допусков.

Рисунок 2.33 – Математическое ожидание величины  $d_{e1}$ Рисунок 2.34 – Доверительные интервалы величины  $d_{e1}$ 

На рисунках 2.35-2.37 приведены частотные гистограммы параметра  $d_{e1}$  для трех сечений по высоте лопатки. Видно, что законы распределения по «старой» выборке близки к нормальным. Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид законов распределения, однако видно, что, в отличие от «старой» выборки наблюдается смещение средних значений по радиусу.

Рисунок 2.35 – Частотные гистограммы величины  $d_{e1}$  для 15-го сечения

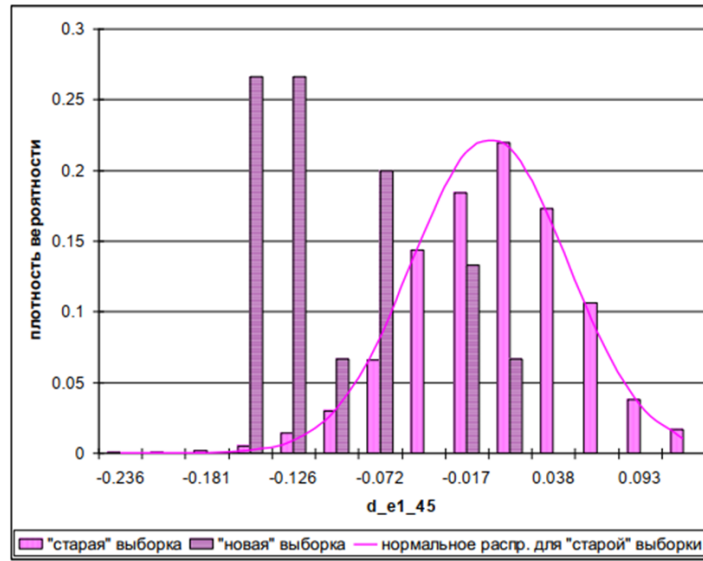


Рисунок 2.36 – Частотные гистограммы величины  $d_{e1}$  для 45-го сечения

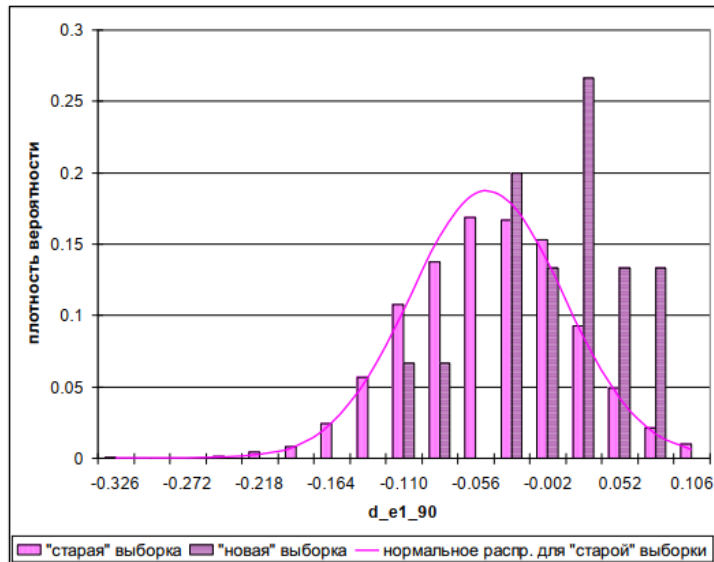


Рисунок 2.37 – Частотные гистограммы величины  $d_{e1}$  для 90-го сечения

На рисунках 2.38 и 2.39 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона параметра  $e1$  с другими измеряемыми параметрами для рассматриваемых сечений.

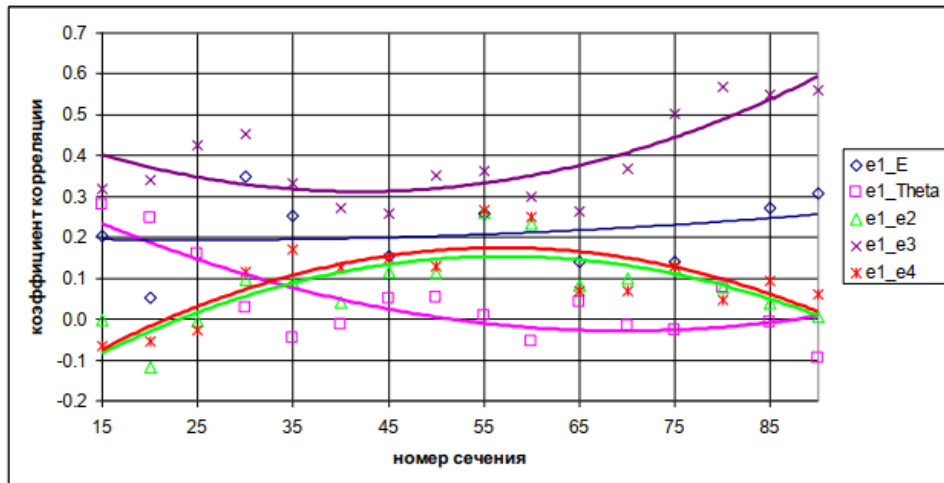


Рисунок 2.38 – Коэффициенты корреляции e1 для «старой» выборки

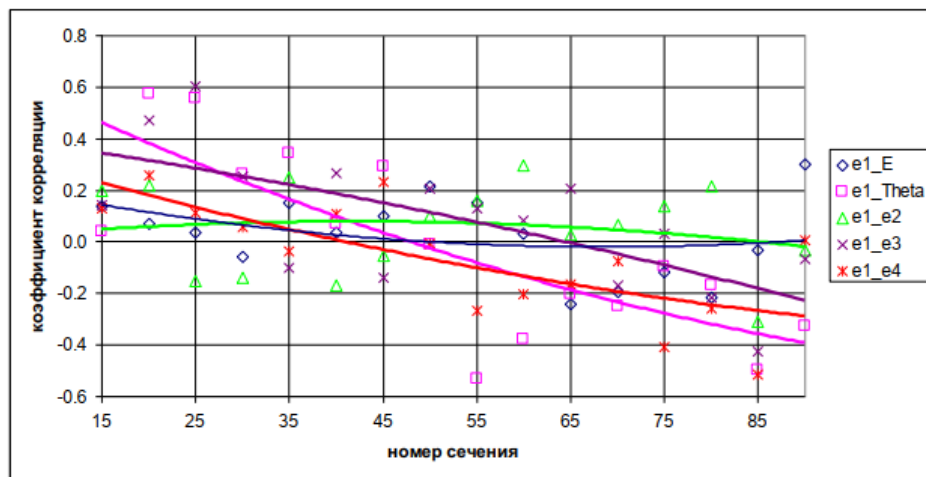


Рисунок 2.39 – Коэффициенты корреляции e1 для «новой» выборки

Видно, что и для «старой», и для «новой» выборок на принятом уровне значимости 0,005 значимые корреляции e1 с другими параметрами отсутствуют за исключением корреляции e1\_e3 для «старой» выборки. Значимость корреляции e1-e3 является весьма логичной, поскольку координаты профиля, для которых измеряются эти толщины, близки. В данном случае неочевидным является отсутствие корреляции e1-e3 для «новой» выборки. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что параметр e1 должен входить в создаваемую параметрическую модель лопатки.

#### 2.4.4 Вероятностный анализ толщины лопатки вблизи выходной кромки (e2)

В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений толщины вблизи выходной кромки от номинальных значений ( $d_{e2}$ ). На рисунке 2.40 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_{e2}$  для «старой» и «новой» выборок, а также границы допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.41

приведены диапазоны, в которые отклонения параметра  $d_{e2}$  попадают с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

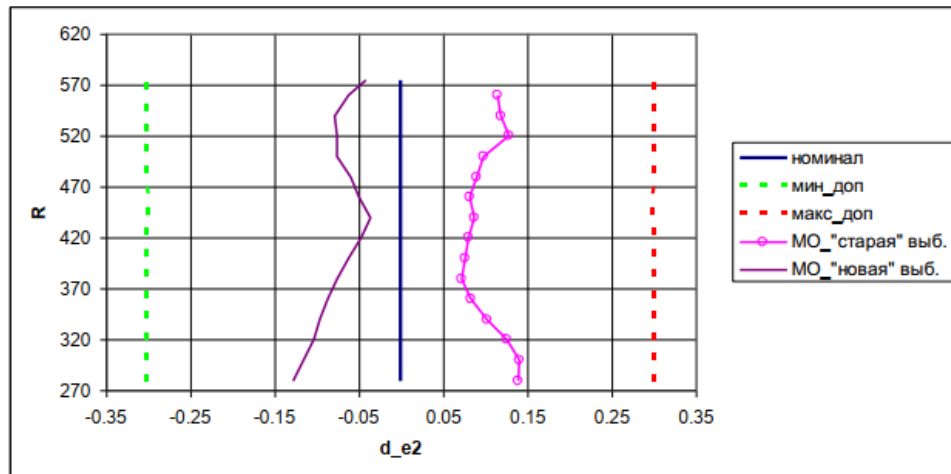


Рисунок 2.40 – Математическое ожидание величины  $d_{e2}$

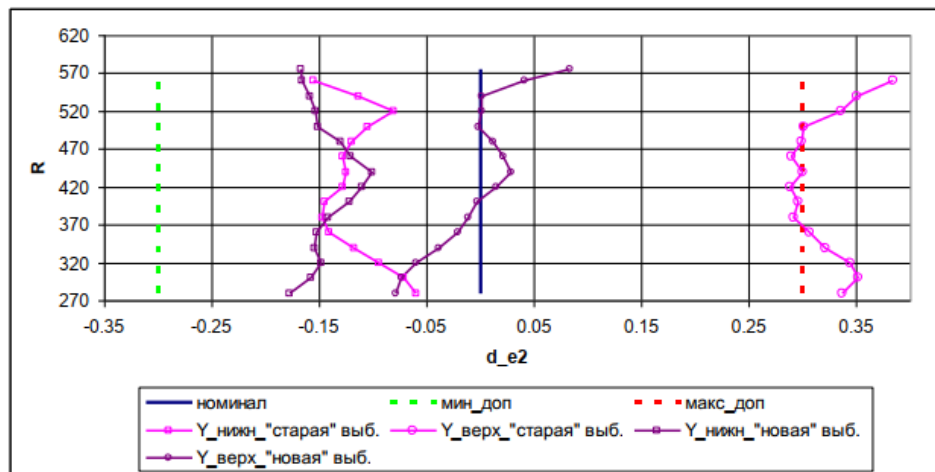


Рисунок 2.41 – Доверительные интервалы величины  $d_{e2}$

Анализ этих результатов показывает, что средние значения отклонений толщины профиля вблизи выходной кромки для «новой» выборки смещены влево по отношению к «старой» выборке. Т.е. для «старой» выборки толщина лопаток вблизи выходной кромки в среднем больше, чем для «новой» выборки. Границы доверительного интервала для «новой» выборки находятся внутри поля допусков, а для «старой» – наблюдается превышение правой границы допуска в корневых и периферийных сечениях.

На рисунках 2.42 и 2.43 приведены зависимости параметров  $d_{e2}$  для 20-го и 85-го сечений по номерам двигателей. Первое, что бросается в глаза, это наличие временного дрейфа параметра  $d_{e2}$ . Для двигателей №145...183 действительно имеется значительное количество превышений максимально допустимой величины. Затем, возможно вследствие каких-то мероприятий, количество таких превышений становится меньше, но увеличивается степень разброса параметра  $d_{e2}$ . Отметим, что наличие таких тенденций (временного дрейфа) в

изменении измеряемых параметров приводит к искажению оценок законов распределения и, в общем случае, требует других подходов к оценке вероятностных параметров, однако это выходит за рамки настоящей работы.

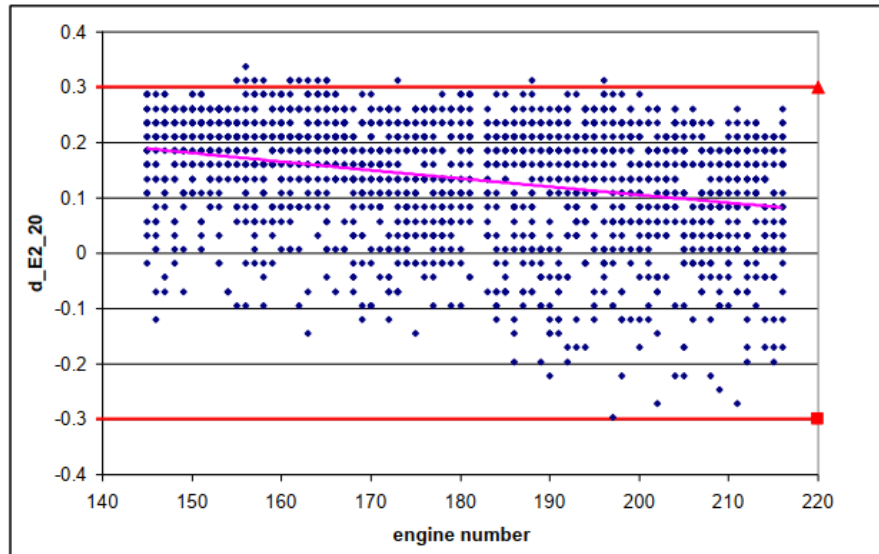


Рисунок 2.42 – Изменение параметра  $d_{e2\_20}$  по номерам двигателей

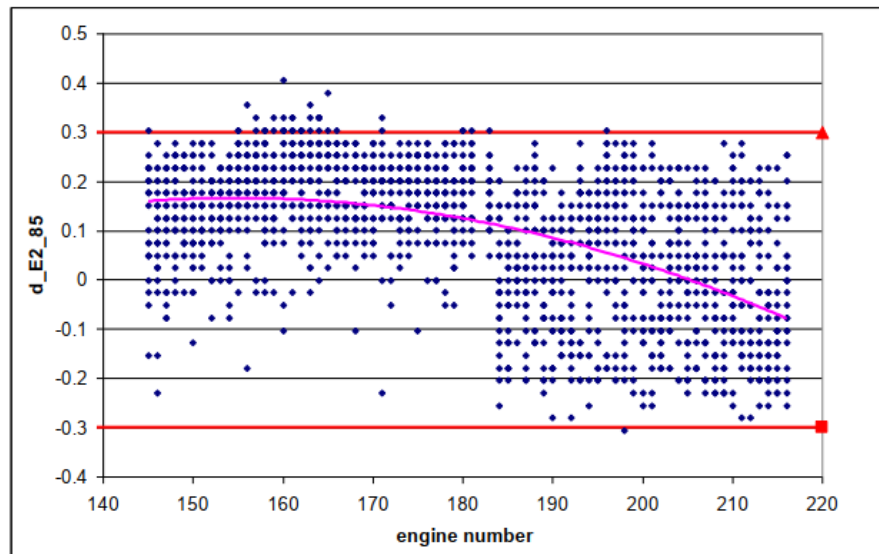
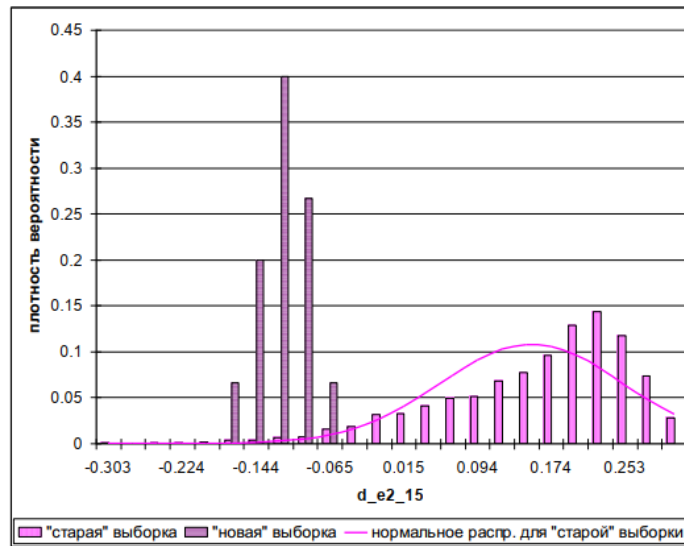
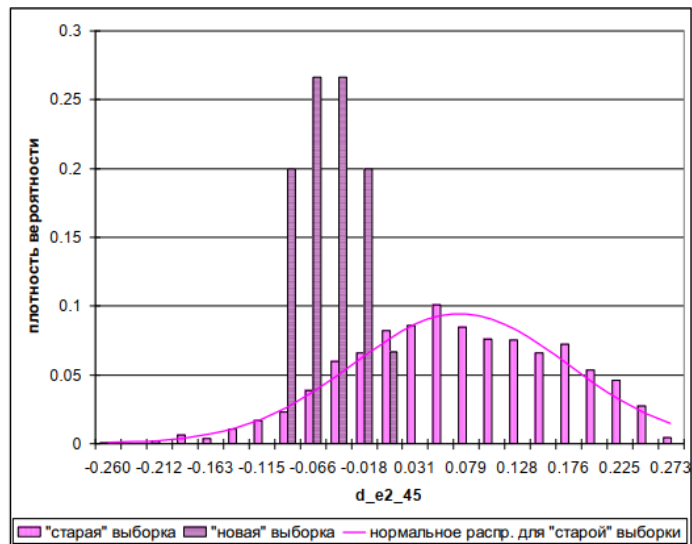
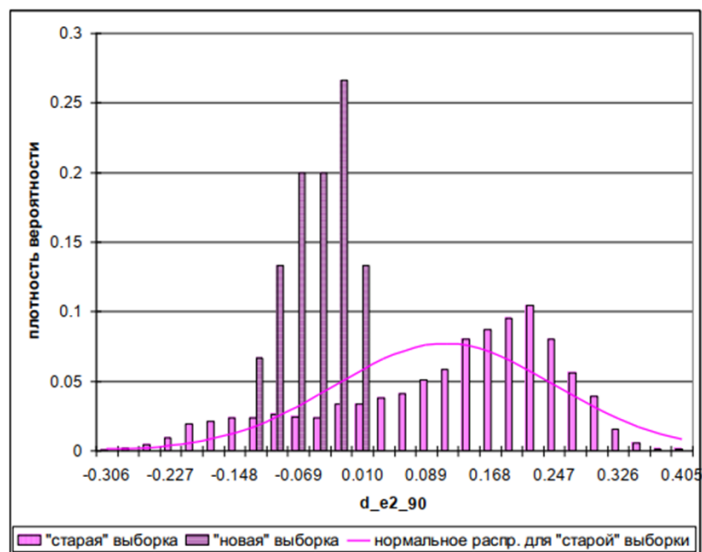


Рисунок 2.43 – Изменение параметра  $d_{e2\_85}$  по номерам двигателей

На рисунках 2.44-2.46 приведены частотные гистограммы параметра  $d_{e2}$  для трех сечений по высоте лопатки. Видно, что законы распределения по «старой» выборке близки к нормальным только для средних сечений, где временной дрейф является незначительным. Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид законов распределения, однако видно, что, в отличие от «старой» выборки разброс значений параметра  $d_{e2}$  существенно меньше.

Рисунок 2.44 – Частотные гистограммы величины  $d_{e2}$  для 15-го сеченияРисунок 2.45 – Частотные гистограммы величины  $d_{e2}$  для 45-го сеченияРисунок 2.46 – Частотные гистограммы величины  $d_{e2}$  для 90-го сечения

На рисунках 2.47 и 2.48 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона параметра  $e_2$  с другими измеряемыми параметрами для рассматриваемых сечений.

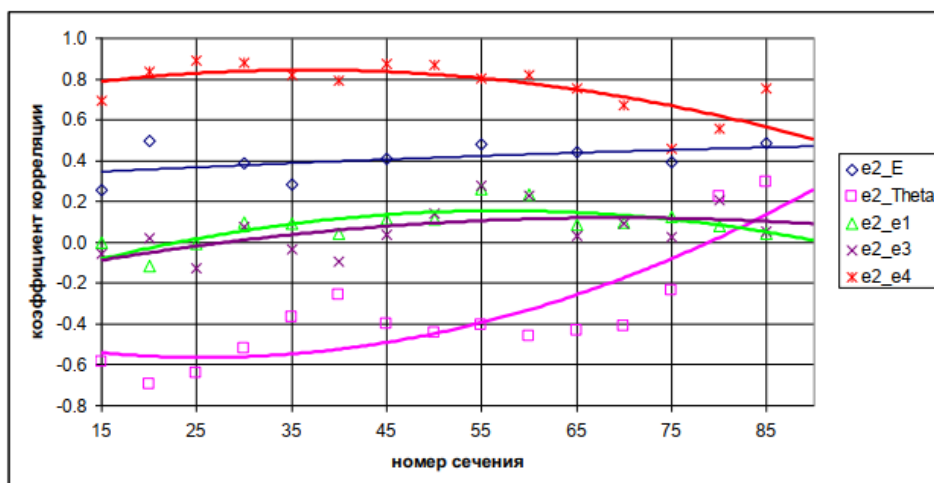


Рисунок 2.47 – Коэффициенты корреляции  $e_2$  для «старой» выборки

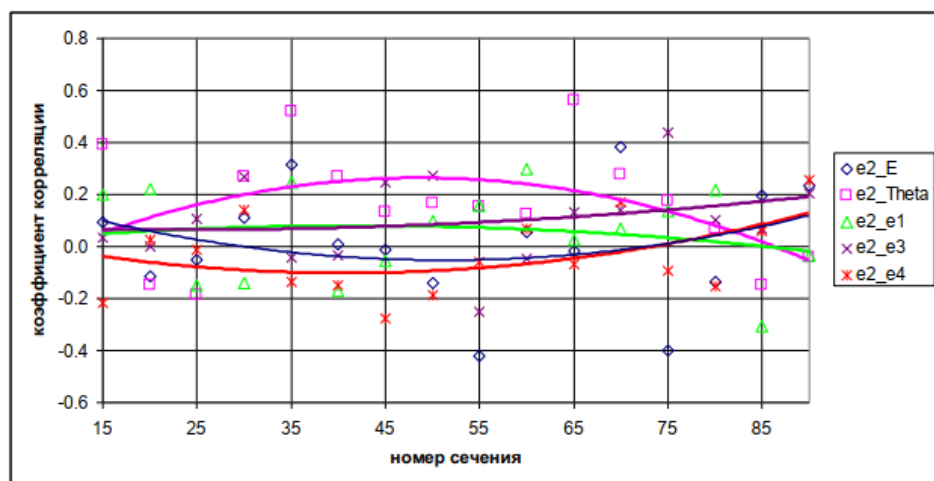


Рисунок 2.48 – Коэффициенты корреляции  $e_2$  для «новой» выборки

Видно, что для «новой» выборки на принятом уровне значимости 0,005 значимые корреляции  $e_2$  с другими параметрами отсутствуют. Для «старой» выборки существует значимая корреляция с параметром  $e_4$ , что является вполне логичным из-за близости координат профиля, для которых измеряются эти толщины. Значимая обратная корреляция  $e_2$ -Theta, по-видимому, объясняется временным дрейфом данных параметров в противоположные стороны. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что параметр  $e_2$  должен обязательно входить в создаваемую параметрическую модель лопатки.

### 2.4.5 Вероятностный анализ толщины лопатки ( $e_3$ )

В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений толщины профиля  $e_3$  от номинальных значений ( $d_{e_3}$ ). На рисунке 2.49 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_{e_3}$  для «старой» и «новой» выборок, а также границы

допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.50 приведены диапазоны, в которые отклонения параметра  $e_3$  попадают с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

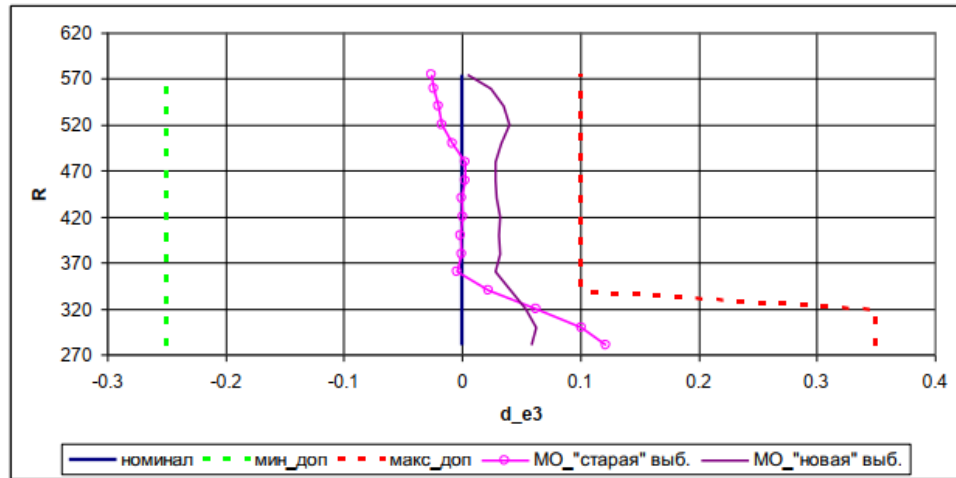


Рисунок 2.49 – Математическое ожидание величины  $d_{e3}$

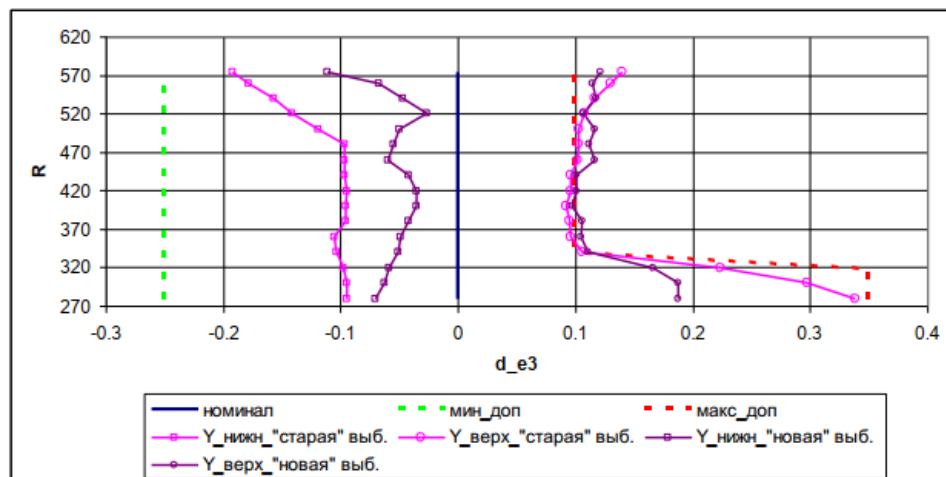


Рисунок 2.50 – Доверительные интервалы величины  $d_{e3}$

Анализ этих результатов показывает, что средние значения отклонений толщины профиля  $e_3$  «новой» и «старой» выборок близки. Для «старой» выборки наблюдается увеличение средних значений  $e_3$  в области корневых сечений, где существенно увеличена правая граница допуска. Правая граница доверительного интервала и для «старой», и для «новой» выборок практически совпадают с правой границей допуска, а применительно к периферийным сечениям наблюдается превышение правой границы допуска. На рисунке 2.51 приведена зависимость параметра  $d_{e3}$  для 85-го сечения по номерам двигателей. Видно, что существует значительное количество лопаток (21 из 1752) с превышением максимально допустимой величины  $e_3$ . Для «новой» выборки лопатка №293381-М также имеет нарушение правой границы допуска для сечений 45%, 65% и 75% высоты.

На рисунках 2.52-2.54 приведены частотные гистограммы параметра  $d_{e3}$  для трех сечений по высоте лопатки. Видно, что законы распределения по «старой» выборке близки к нормальным для средних сечений и периферийных сечений, а для корневых сечений, где существенно увеличено поле допуска, закон распределения более близок к равномерному.

Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид законов распределения, однако видно, что, в отличие от «старой» выборки наблюдается меньший разброс значений параметра  $d_{e3}$  особенно для корневых сечений.

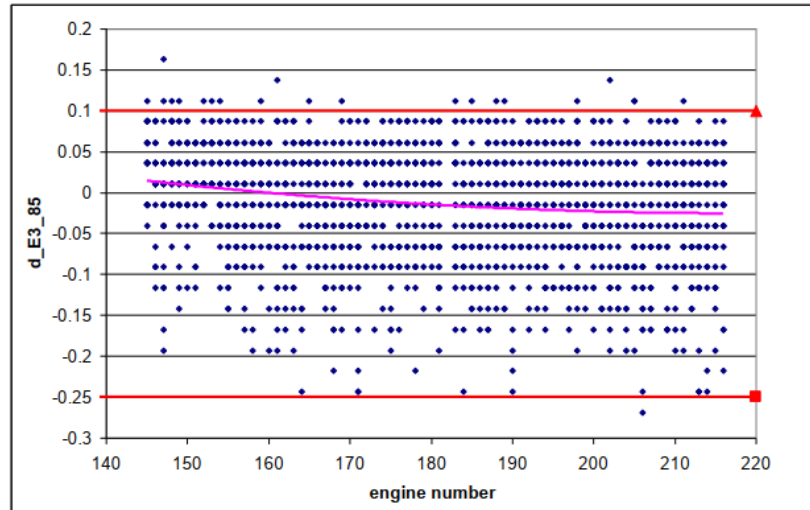


Рисунок 2.51 – Изменение параметра  $d_{e3\_85}$  по номерам двигателей

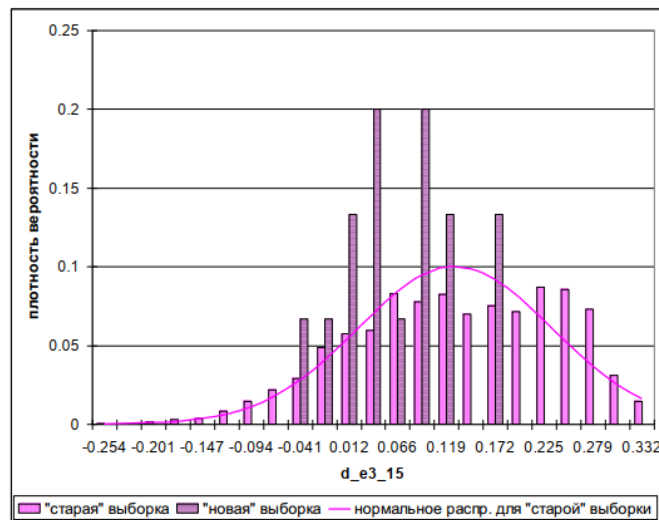
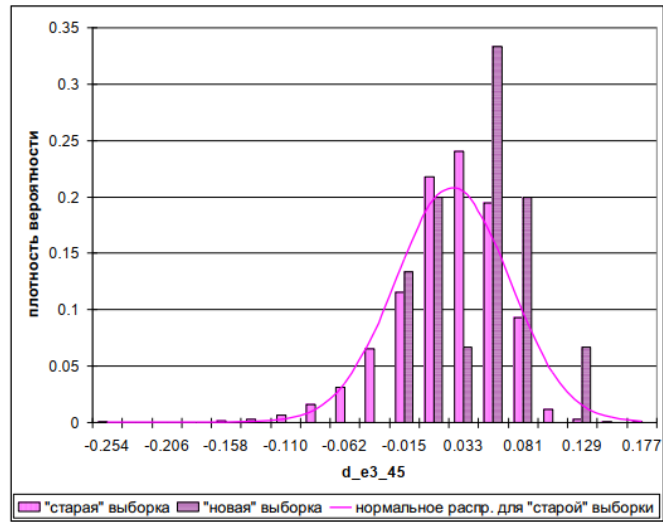
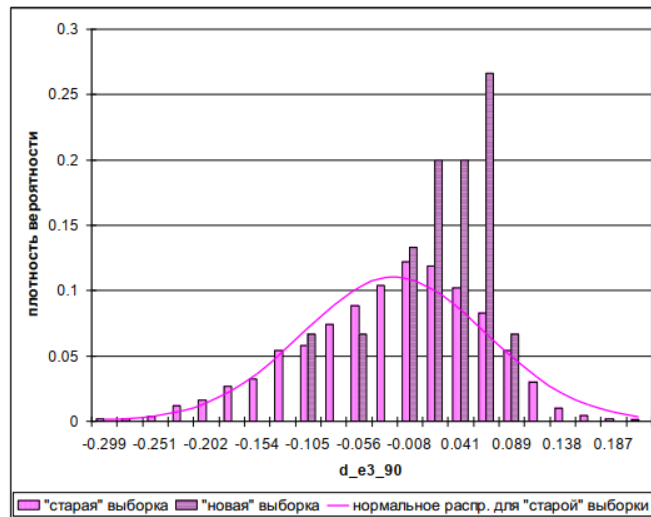
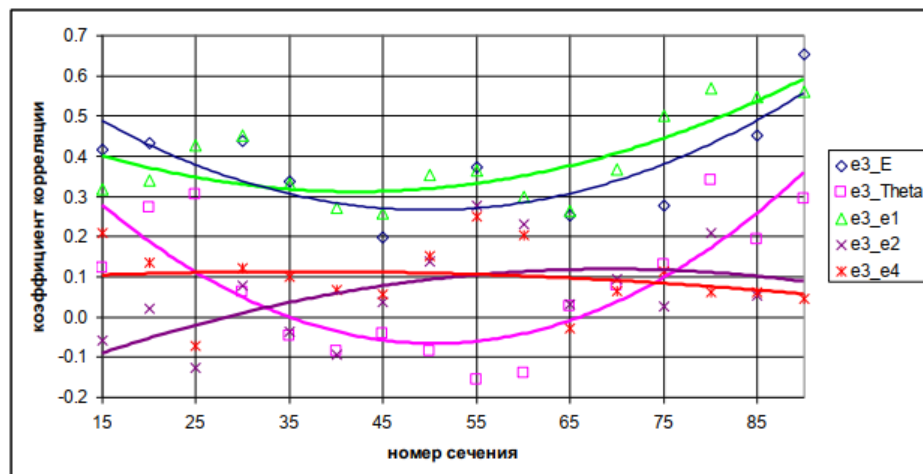


Рисунок 2.52 – Частотные гистограммы величины  $d_{e3}$  для 15-го сечения

Рисунок 2.53 – Частотные гистограммы величины  $d_{e3}$  для 45-го сеченияРисунок 2.54 – Частотные гистограммы величины  $d_{e3}$  для 90-го сечения

На рисунках 2.55 и 2.56 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона параметра  $e3$  с другими измеряемыми параметрами для рассматриваемых сечений.

Рисунок 2.55 – Коэффициенты корреляции  $e3$  для «старой» выборки

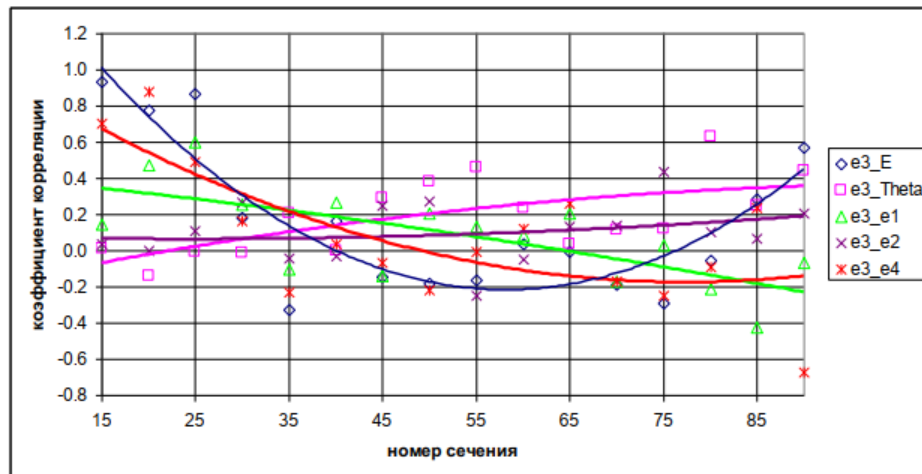


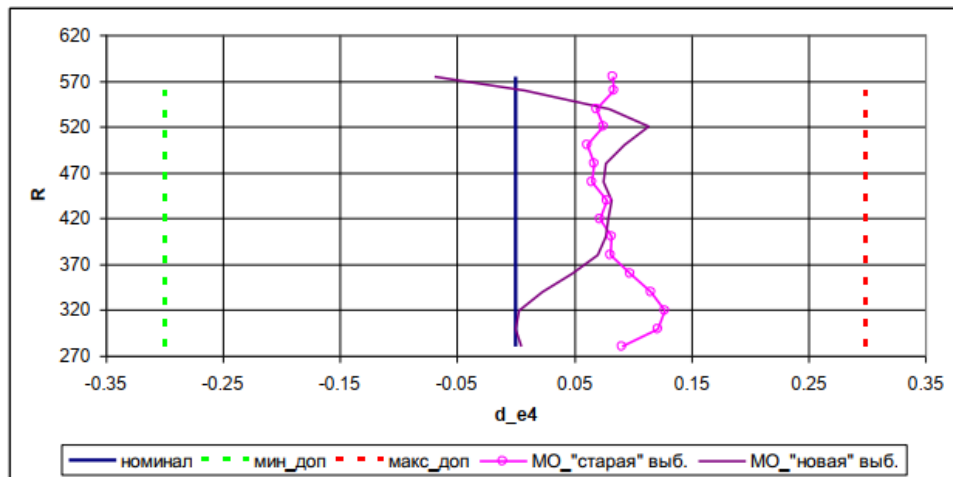
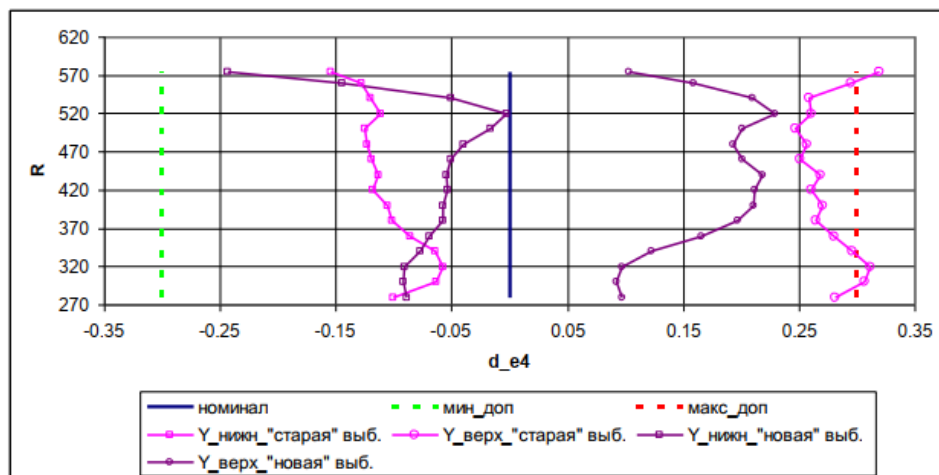
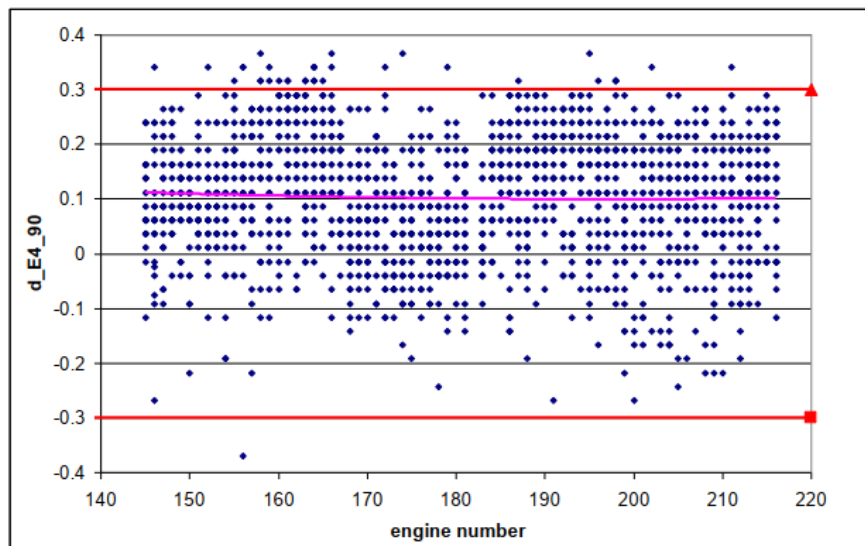
Рисунок 2.56 – Коэффициенты корреляции e3 для «новой» выборки

Видно, что для «новой» выборки на принятом уровне значимости 0,005 значимые корреляции e3 с другими параметрами отсутствуют за исключением корреляции e3-E для корневых сечений. В то же время для «старой» выборки существуют значимые корреляции e3-E и e3-e1, что является вполне логичным из-за близости координат профиля, для которых измеряются эти толщины, и позволяет не включать данный параметр в создаваемую параметрическую модель.

#### 2.4.6 Вероятностный анализ толщины лопатки (e4)

В данном разделе вероятностный анализ выполнен для отклонений толщины профиля e4 от номинальных значений ( $d_{e4}$ ). На рисунке 2.57 показано изменение по радиусу математического ожидания величины  $d_{e4}$  для «старой» и «новой» выборок, а также границы допусков, т.е. минимально и максимально допустимые значения. На рисунке 2.58 приведены диапазоны, в которые отклонения параметра e4 попадают с вероятностью 95% в предположении нормальности закона распределения.

Анализ этих результатов показывает, что средние значения отклонений толщины профиля e4 «новой» и «старой» выборок близки. Для «новой» выборки наблюдается уменьшение средних значений e4 в области корневых и периферийных сечений. В результате границы доверительного интервала для «новой» выборки находятся внутри поля допусков, а для «старой» выборки правая граница доверительного интервала превышает правую границу допуска применительно к корневому и периферийным сечениям. На рисунке 2.59 приведена зависимость параметра  $d_{e4}$  для 90-го сечения по номерам двигателей. Видно, что существует значительное количество лопаток (34 из 1752) с превышением максимально допустимой величины e4.

Рисунок 2.57 – Математическое ожидание величины  $d_{e4}$ Рисунок 2.58 – Доверительные интервалы величины  $d_{e4}$ Рисунок 2.59 – Изменение параметра  $d_{e4\_90}$  по номерам двигателей

На рисунках 2.60-2.62 приведены частотные гистограммы параметра  $d_{e4}$  для трех сечений по высоте лопатки. Видно, что законы распределения по «старой» выборке близки к

нормальным для средних сечений, а для корневых сечений и периферийных сечений, где возможно превышение правой границы допуска и, соответственно, возможно отбраковка или доработка лопаток, наблюдаются отклонения от нормальности. Ограниченность объема «новой» выборки не позволяет однозначно оценить вид законов распределения, однако видно, что, в отличие от «старой» выборки наблюдается смещение средних значений влево для корневых и периферийных сечений.

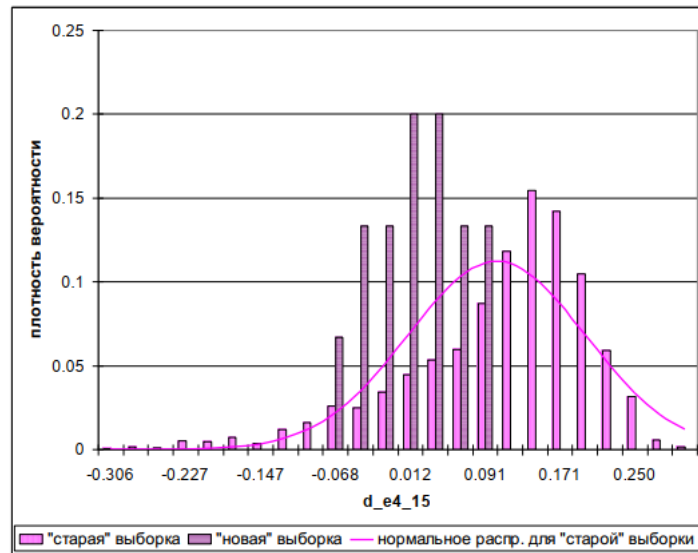


Рисунок 2.60 – Частотные гистограммы величины  $d_{e4}$  для 15-го сечения

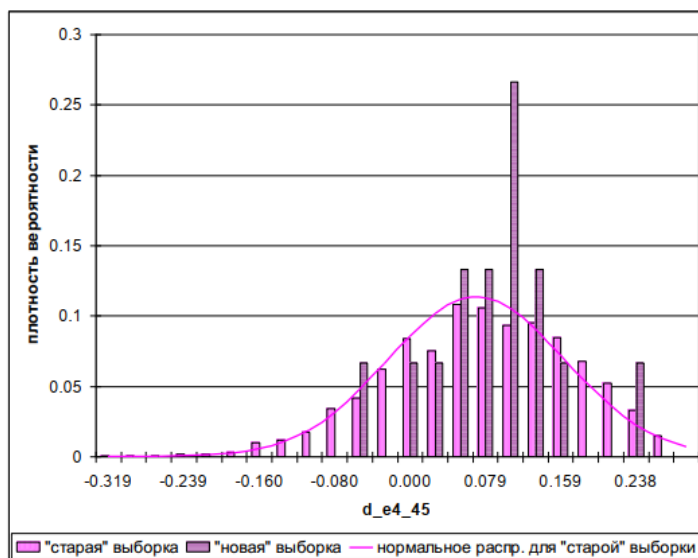


Рисунок 2.61 – Частотные гистограммы величины  $d_{e4}$  для 45-го сечения

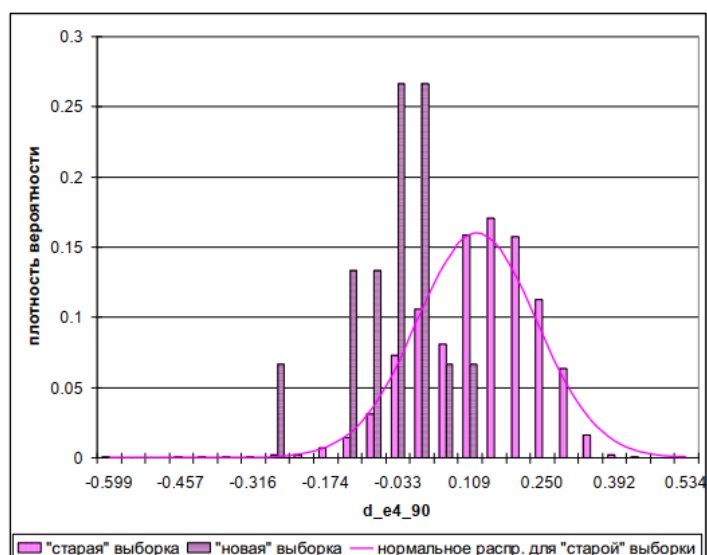


Рисунок 2.62 – Частотные гистограммы величины  $d_{e4}$  для 90-го сечения

На рисунках 2.63 и 2.64 представлены оценки коэффициента корреляции Пирсона параметра  $e4$  с другими измеряемыми параметрами для рассматриваемых сечений.

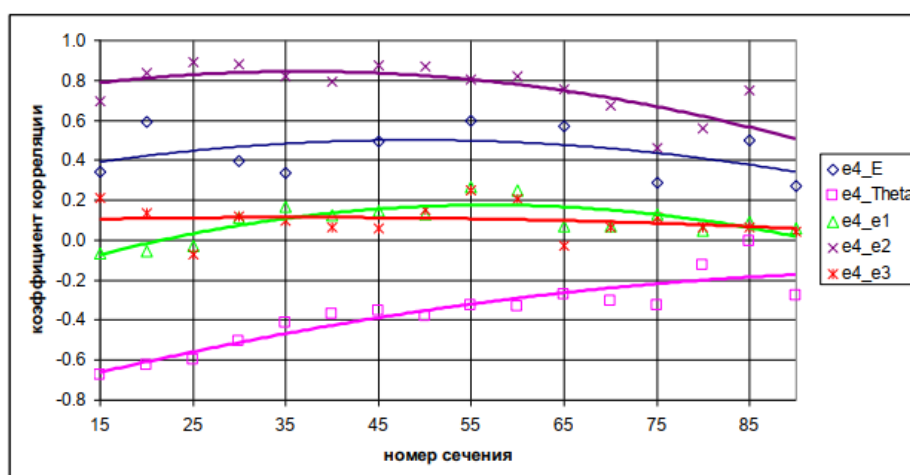


Рисунок 2.63 – Коэффициенты корреляции  $e4$  для «старой» выборки

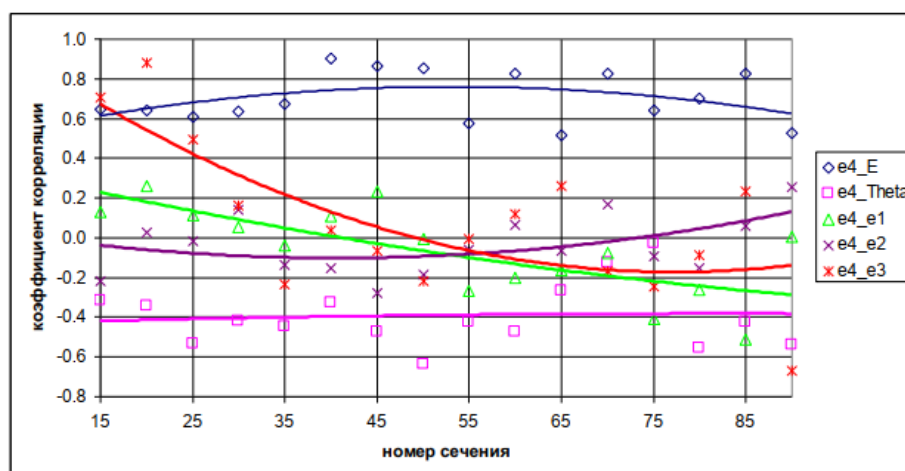


Рисунок 2.64 – Коэффициенты корреляции  $e4$  для «новой» выборки

Видно, что для «старой» выборки существуют значимые корреляции  $\epsilon_4$ -E и  $\epsilon_4$ - $\epsilon_2$ , что является вполне логичным из-за близости координат профиля, для которых измеряются эти толщины. Значимая обратная корреляция  $\epsilon_4$ - $\Theta$ , скорее всего, объясняется временным дрейфом параметра  $\Theta$ . Для «новой» выборки на принятом уровне значимости 0,005 значимой является только корреляция  $\epsilon_4$ -E. Значимые корреляции  $\epsilon_4$ -E и  $\epsilon_4$ - $\epsilon_2$  для «старой» выборки позволяет не включать данный параметр в создаваемую параметрическую модель.

#### 2.4.7 Анализ корреляций измеряемых параметров по радиусу и выбор рационального состава параметров для параметрической модели

Завершающим этапом вероятностного анализа геометрических параметров лопаток вентилятора, изложенного в разделах 2.4.1-2.4.6, выступает корреляционное исследование одноименных параметров по радиусу проточной части. Результаты данного анализа служат основанием для выбора рационального набора параметров, подлежащих включению в состав параметрической модели. Результаты этого анализа в виде зависимостей коэффициента корреляции параметров в сечении 45 от номера сечения представлены на рисунках 2.65 и 2.66 для «старой» и «новой» выборок соответственно.

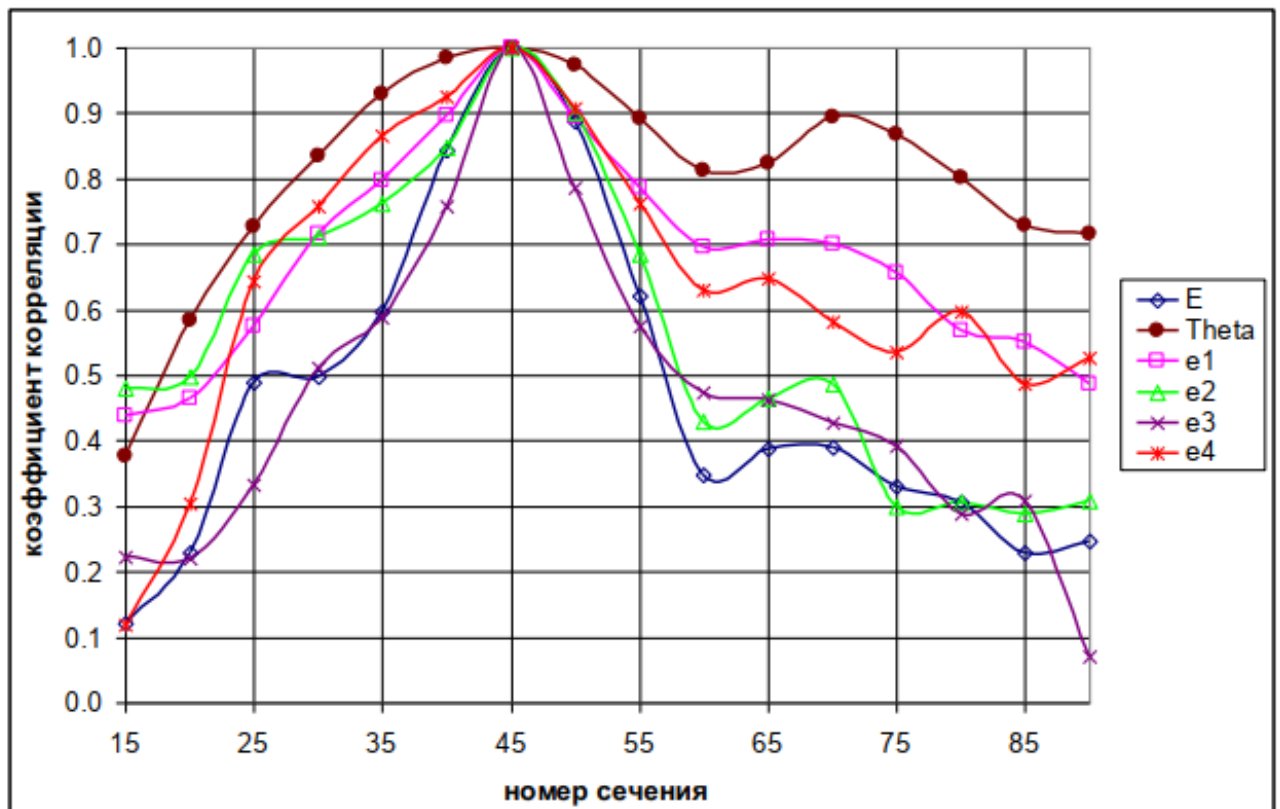


Рисунок 2.65 – Изменение коэффициента корреляции параметров в сечении 45 от номера сечения для «старой» выборки

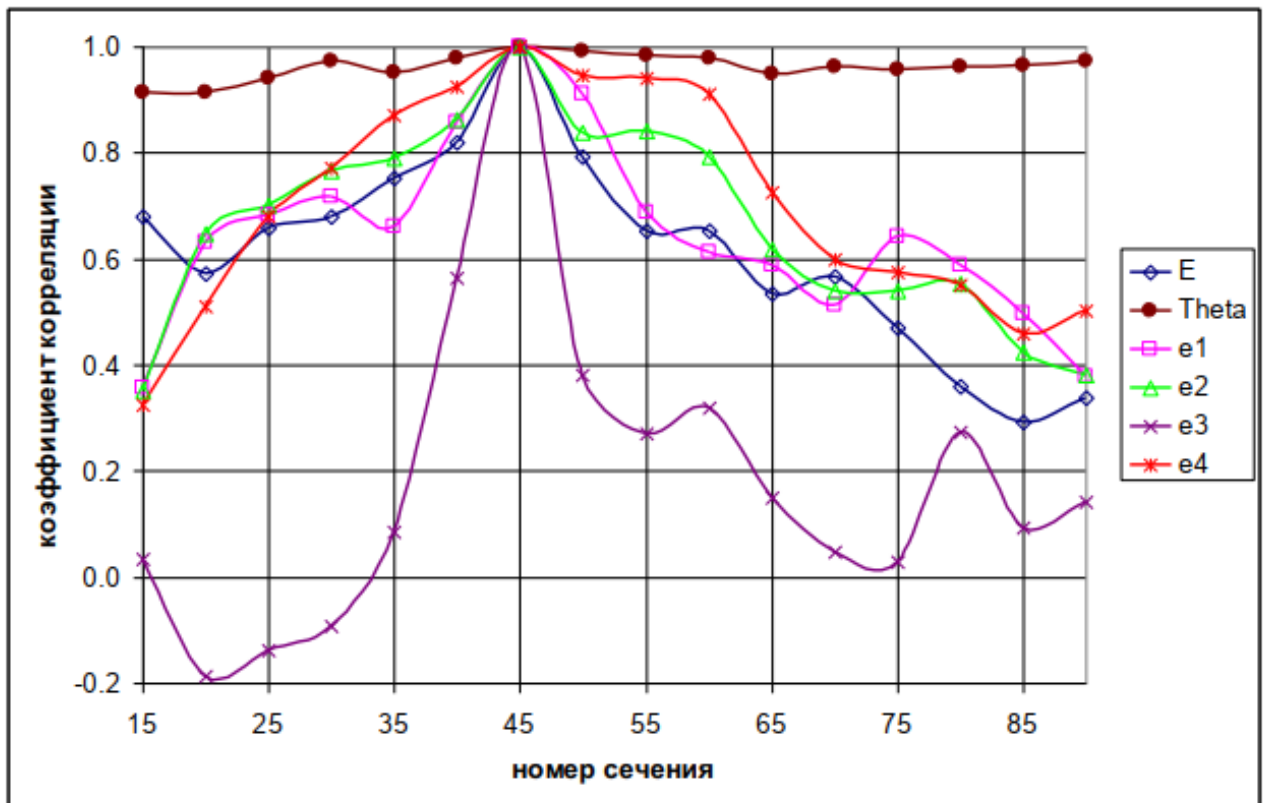


Рисунок 2.66 – Изменение коэффициента корреляции параметров в сечении 45% от номера сечения для «новой» выборки

Критическое значение коэффициента корреляции для уровня значимости 0,005 применительно к «старой» выборке составляет величину 0,21, а применительно к «новой» выборке – 0,64. Видно, что, применительно к «старой» выборке, коэффициенты корреляции всех параметров уменьшаются по мере удаления от сечения 45%, но остаются значимыми. Другими словами, если величина какого-то параметра (например, E) в сечении 45% оказалась увеличенной, то с большой вероятностью будут увеличенными значения этого параметра и для всех остальных сечений. В то же время для корневых и периферийных сечений значения коэффициентов корреляции некоторых параметров с сечением 45% уже близки к критическим значениям и, следовательно, могут рассматриваться как независимые. Таким образом, при создании параметрической модели рассматриваемой лопатки в качестве независимых параметров можно рассматривать параметры в сечениях 45%, 75% и 90% высоты.

Отдельного внимания заслуживает анализ корреляций параметра e3 по «новой» выборке. Напомним, что при анализе корреляции этого параметра с другими (E,  $\Theta$ , e1, e2, e4) значимых корреляций обнаружено не было. Из рисунка 2.66 следует, что параметр e3 не коррелирует и «сам с собой» на разных радиусах. Вообще говоря, такая ситуация маловероятна и заставляет предположить наличие какого-то дополнительно элемента случайности либо в измерениях, либо в алгоритмах обработки параметра e3, хотя объем «новой» выборки пока не позволяет делать какие-то однозначные выводы. Таким образом, наряду с отклонениями положения центра

тяжести профиля ( $T_x$  и  $T_y$ ), результаты корреляционного анализа позволяют обоснованно рекомендовать к включению в параметрическую модель следующие геометрические параметры: угол установки профиля ( $\Theta$ ), максимальная толщина профиля ( $E$ ), а также толщины лопаток вблизи входной и выходной кромок ( $e_1$ ) и ( $e_2$ ), определяемые в характерных сечениях по радиусу – 45%, 75% и 90% высоты.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Представлено подробное описание методики прецизионного контроля геометрических параметров профиля пера рабочей лопатки вентилятора с использованием координатно-измерительной машины портального типа COORD3 HERA NT. Методика включает алгоритмы базирования детали, сканирования поверхности по заданной сетке точек (1230 точек на 20+1 сечений) и математической обработки данных. Реализован алгоритм припасовки измеренных профилей к номинальной САД-модели методом наименьших квадратов (с использованием SVD-разложения), позволяющий разделить погрешности положения (смещение центра тяжести  $T_x, T_y$ , угол установки  $\Theta$ ) и погрешности формы профиля ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ).

Подтверждена эффективность применения универсальных КИМ вместо специализированных контрольных приспособлений для контроля сложнопрофильных деталей. Достигнутая погрешность измерений (в пределах 0,002–0,018 мм в зависимости от сечения и параметра) обеспечивает необходимую достоверность данных для последующего построения параметрических моделей. Использование револьверной измерительной головки Renishaw RH10M позволило автоматизировать процесс измерения труднодоступных зон (кромки) без переустановки детали.

На основе сравнительного анализа двух выборок данных проведена оценка вероятностных характеристик ключевых геометрических параметров: максимальной толщины профиля ( $E$ ), угла установки ( $\Theta$ ) и толщин у кромок ( $e_1, e_2, e_3, e_4$ ), в рамках которой:

- выявлено, что законы распределения большинства параметров близки к нормальным, однако в зонах, близких к границам допусков, наблюдаются искажения, обусловленные технологической отбраковкой;

- установлено, что для периферийных сечений характерен повышенный разброс угла установки  $\Theta$ , что требует особого внимания при контроле.

Проведен корреляционный анализ между измеряемыми геометрическими параметрами как внутри одного сечения, так и по радиусу лопатки, в рамках которого:

- выявлена корреляция между максимальной толщиной профиля  $E$  и толщинами у выходной кромки  $e_4$  (и частично  $e_2, e_3$ ), что позволяет исключить последние из числа независимых варьируемых параметров в упрощенных моделях, если используется  $E$ ;

– анализ корреляции между сечениями показал, что параметры в сечениях 45%, 75% и 90% высоты лопатки могут рассматриваться как предпочтительные, через которые возможна интерполяция геометрии всего пера.

На основании результатов статистического и корреляционного анализа обоснован рациональный набор управляющих переменных для создания параметрической 3D-модели лопатки. В состав модели включены следующие параметры, определяемые в трех характерных сечениях (45%, 75%, 90% высоты):

- смещения центра тяжести сечения ( $T_x, T_y$ );
- угол установки профиля ( $\Theta$ );
- максимальная толщина профиля ( $E$ );
- толщины профиля у входной ( $e_1$ ) и выходной ( $e_2$ ) кромок.

Данный набор параметров обеспечивает баланс между полнотой описания реальной геометрии (с учетом производственного разброса) и вычислительной эффективностью последующих прочностных и аэродинамических расчетов.

## ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

Параметрическое моделирование представляет собой метод создания цифровых моделей, основанный на использовании совокупности геометрических и конструктивных параметров, а также аналитических и логических связей между ними. В отличие от традиционного двумерного черчения или непараметрического трехмерного моделирования, параметрический подход предполагает формирование математически описанных зависимостей, при которых изменение одного или нескольких параметров автоматически приводит к перестроению всей геометрии модели с учетом заданных отношений и ограничений.

Данный метод обеспечивает высокую степень гибкости и управляемости процесса проектирования, позволяя в краткие сроки осуществлять итерационный анализ множества конфигураций детали при сохранении ее функциональной и конструктивной целостности. Особенно актуально это в контексте проектирования сложных пространственных объектов, таких как рабочие лопасти вентилятора, геометрия которых характеризуется высокой степенью кривизны и аэродинамической специфичностью [108-113].

В рамках настоящего исследования реализована геометрическая параметризация модели рабочей лопасти, что обеспечило возможность эффективного редактирования и адаптации формы профиля. При изменении базовых элементов модели все зависимые компоненты автоматически перестраиваются в соответствии с заданными геометрическими соотношениями, топологическими связями и кинематическими ограничениями. Такой подход не только снижает вероятность возникновения принципиальных ошибок на этапе проектирования, но и способствует повышению точности и повторяемости результатов при проведении многовариантных расчетов и оптимизации аэродинамических характеристик.

Общий алгоритм разработанной методики геометрической параметризации 3D-модели рабочей лопасти вентилятора, построенной на основе данных координатных измерений, представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.1. Настоящая методика предусматривает систематизированное задание управляющих параметров, определяющих форму профиля, положение сечений по высоте лопасти и геометрию пера в целом, с учетом сохранения топологической целостности и соблюдения физически обусловленных ограничений [114, 115].

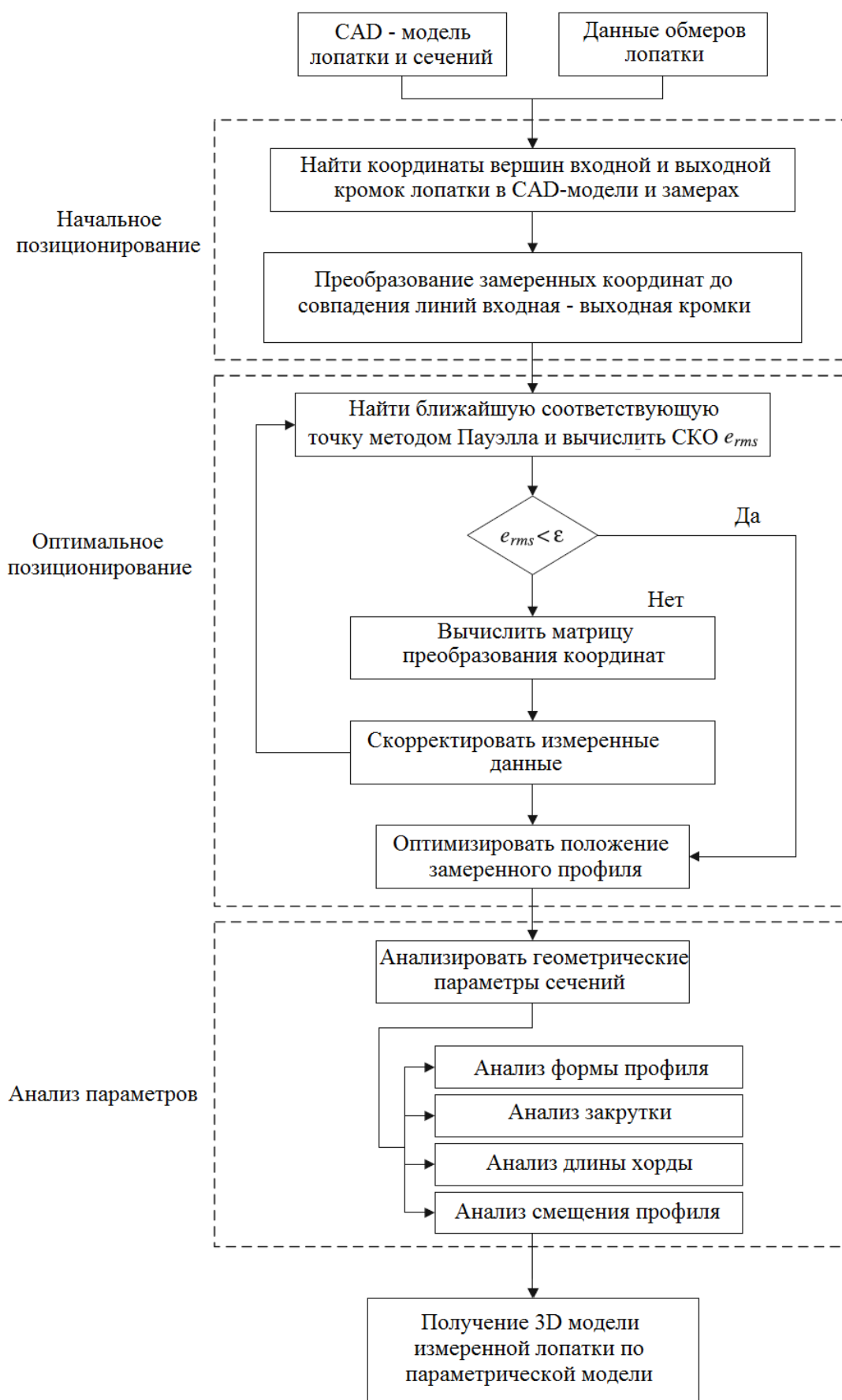


Рисунок 3.1 – Алгоритм разработанной методики геометрической параметризации 3D-модели рабочей лопатки вентилятора

Стоит отметить, что расчетная модель для выполнения прочностного анализа представляет собой сектор рабочего колеса вентилятора, включающий лопатку, диск, замковое соединение, полку, участок ротора и элементы фиксирующего устройства (см. Рисунок 3.2, а). Такое выделение сектора обусловлено симметрией конструкции и позволяет сократить вычислительные затраты при сохранении достоверности результатов расчета напряженно-деформированного состояния.

На основании результатов прочностного анализа лопаток вентилятора в условиях «холодной» геометрии были построены параметрические трехмерные модели их «горячей» формы, учитывающие статические перемещения, возникающие под действием центробежных и температурных нагрузок в рабочем режиме. Полученные геометрические модели деформированных лопаток используются в дальнейшем для проведения газодинамических расчетов в рамках проводимого оптимизационного исследования.

При построении параметрических моделей лопаток вентилятора в «горячей» конфигурации приняты определенные упрощающие допущения. Геометрическая модель представляет собой идеализированный вариант реальной проточной части и включает в себя контуры втулки и корпуса, а также лопаточные венцы (см. Рисунок 3.2, б). При этом детализация конструктивных элементов, не влияющих существенно на газодинамические характеристики, сведена к минимуму для обеспечения эффективности численного моделирования.

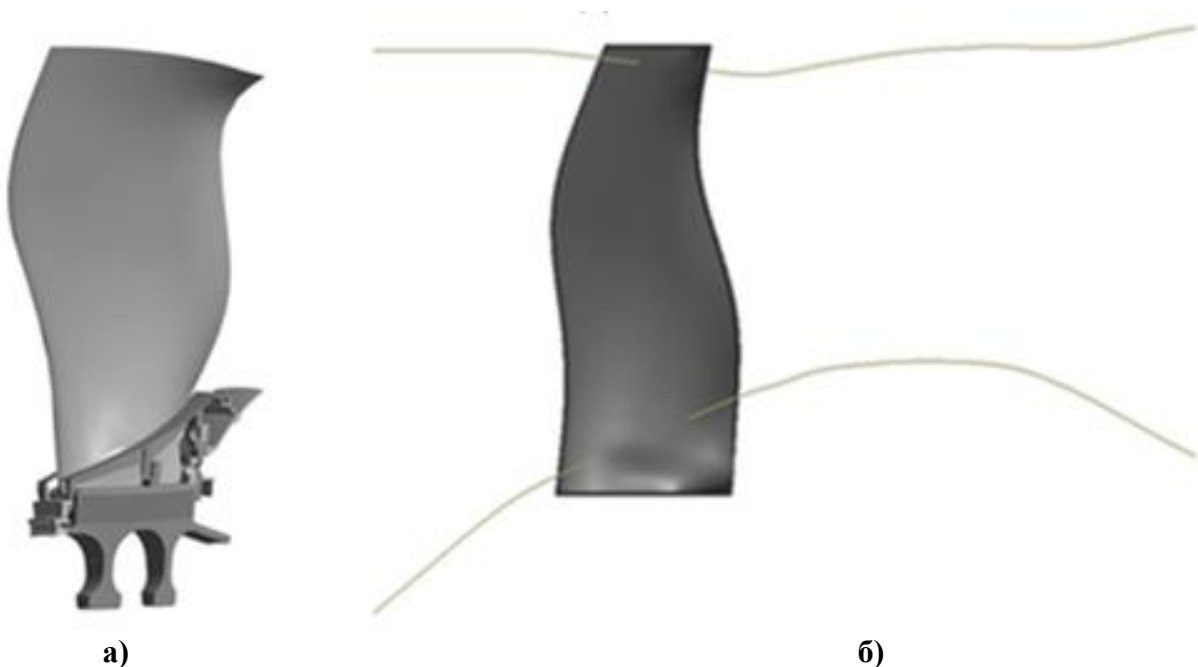


Рисунок 3.2 – Параметрические модели рабочей лопатки вентилятора  
(а – параметрическая модель для прочностных расчетов; б – параметрическая модель для аэродинамических расчетов)

Реализованная методика геометрической параметризации обеспечивает прямую и обратную связь между изменяемыми параметрами и геометрической конфигурацией, что

позволяет оперативно генерировать геометрически корректные варианты лопатки при проведении серийных расчетов и автоматизированной оптимизации аэродинамических характеристик. Использование параметризации способствует повышению эффективности проектных работ, сокращению временных затрат на модификацию геометрии и минимизации риска возникновения неконструктивных конфигураций на ранних стадиях проектирования.

### **3.1 Методика создания параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы**

Особую значимость в процессе исследования лопаток газотурбинных двигателей занимает этап построения параметрической 3D-модели, включая так называемую «холодную» форму – геометрическую конфигурацию лопатки, соответствующую ее состоянию в условиях отсутствия эксплуатационных температурных и силовых воздействий. Данная форма в процессе производства реконструируется на основе данных, полученных в ходе финишных контрольно-измерительных мероприятий, и служит базисом для последующего анализа производственных отклонений.

Важным аспектом является применение параметрического подхода к моделированию, который обеспечивает высокую степень управляемости геометрии, позволяет оперативно вносить конструктивные изменения, организовывать серийные расчеты и проводить многовариантную оптимизацию.

Точные и параметризованные 3D-модели «холодной» формы являются необходимым элементом для выполнения расчетов аэродинамических и прочностных характеристик, а также для подготовки производственных процессов.

#### **3.1.1 Порядок построения параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы**

Для обеспечения автоматизированного построения параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы на основе данных контрольно-измерительных мероприятий разработана программный комплекс «BladeToolMAI» [116]. Данная система обеспечивает параметрическое управление геометрией профиля за счет модификации положения его характерных линий относительно номинальной геометрической модели лопатки, что позволяет оперативно формировать адаптированные 3D-модели с учетом реальных отклонений формы.

Программный комплекс «BladeToolMAI» реализует несколько режимов обработки входных данных, направленных на построение и модификацию геометрической модели лопатки в зависимости от поставленных технологических задач. Выбор конкретного режима работы

определяет состав и структуру входных данных, подаваемых на вход программы, а также алгоритмы обработки и аппроксимации геометрической информации.

На рисунке 3.3 представлена блок-схема методики построения параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы по данным контрольно-измерительных мероприятий, реализованная в программном комплексе «BladeToolMAI».

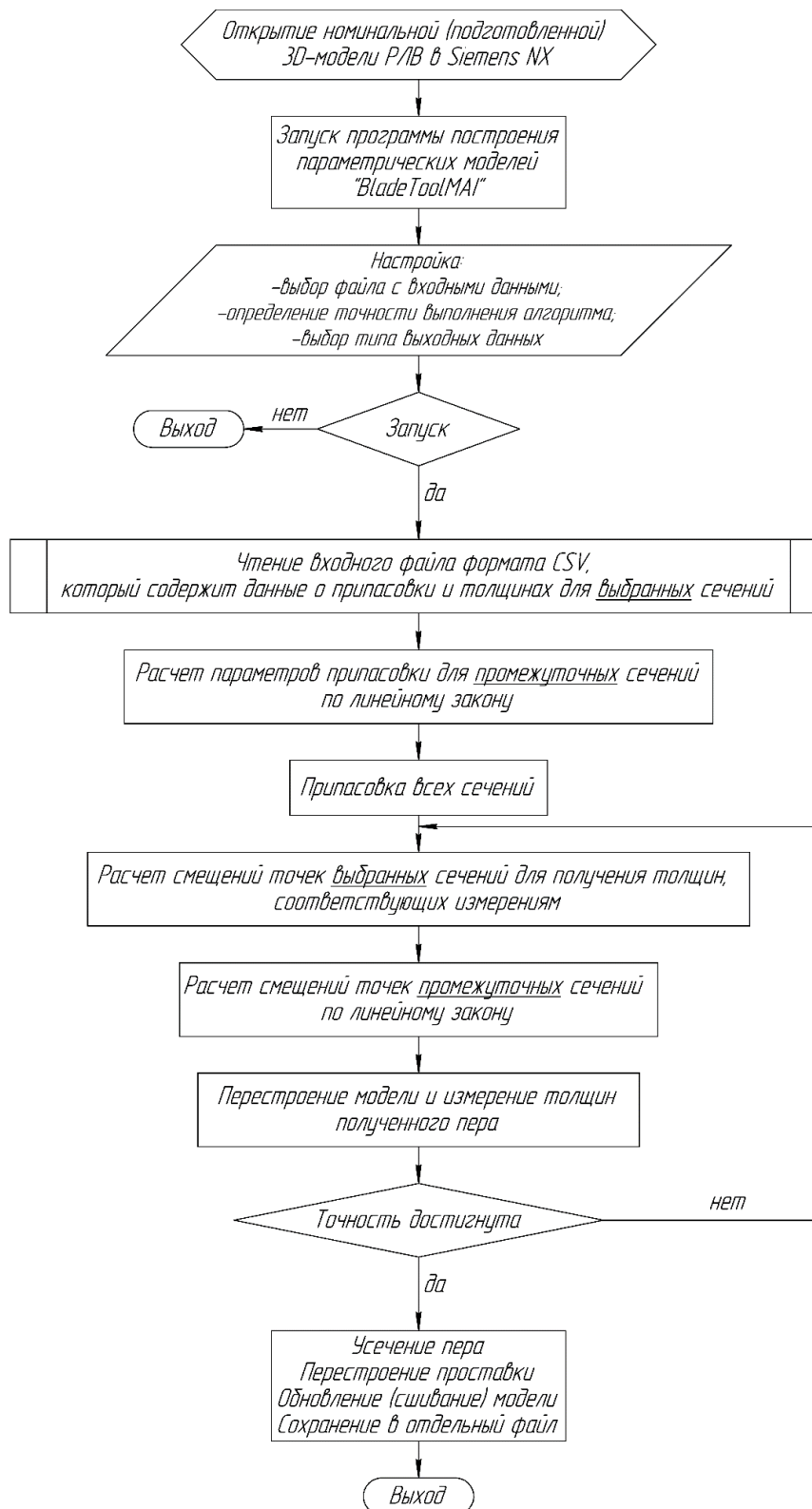


Рисунок 3.3 – Блок-схема программы «BladeToolMAI»

В рамках функциональных возможностей программного обеспечения реализованы следующие режимы обработки:

1. Полная модификация геометрии лопатки на основе данных припасовки по всем сечениям и результатов измерений отклонений в полном наборе контрольных точек. Данный режим обеспечивает максимально точное воспроизведение геометрии, соответствующей реальному состоянию детали, и требует в качестве входных данных параметры припасовки всех сечений и массив измеренных отклонений по всем точкам измерительной сетки.

2. Частичная модификация с интерполяцией промежуточных данных – режим, при котором данные припасовки и измерений отклонений доступны только для трех характерных сечений (45%; 75%; 90% высоты). Геометрия остальных сечений восстанавливается по линейному закону с учетом специфики измерительной процедуры и конструктивных особенностей лопатки. Входными данными являются параметры припасовки и измеренные отклонения исключительно для указанных сечений.

3. Модификация по данным припасовки и толщинам по всем сечениям – режим, в котором корректировка положения реперных точек сечений выполняется на основе полного набора данных о припасовке и толщинах. Алгоритм допускает использование как линейной, так и квадратичной аппроксимации при перераспределении геометрических параметров. Входные данные могут быть представлены в виде CSV-файла с экспериментальными данными или в формате DAT – выходном формате самой программы.

4. Упрощенная модификация по трем сечениям с восстановлением по конструкторским данным – режим, ориентированный на обработку ограниченного объема измерительной информации (припасовка и толщины только для сечений 45%; 75% и 90% высоты). Геометрия промежуточных сечений реконструируется по линейному закону с привязкой к номинальным (конструкторским) значениям. Положение ключевых точек сечений корректируется с использованием линейной или квадратичной интерполяции. Входные данные могут быть представлены в виде CSV-файла с указанными параметрами или в формате DAT.

5. Работа в режиме командной строки – обеспечивает автоматизированное выполнение операций без использования графического интерфейса, что позволяет интегрировать программу в скриптовые среды и использовать в составе автоматизированных технологических цепочек.

Графический интерфейс программы «BladeToolMAI», реализующий указанные режимы, представлен на рисунке 3.4.

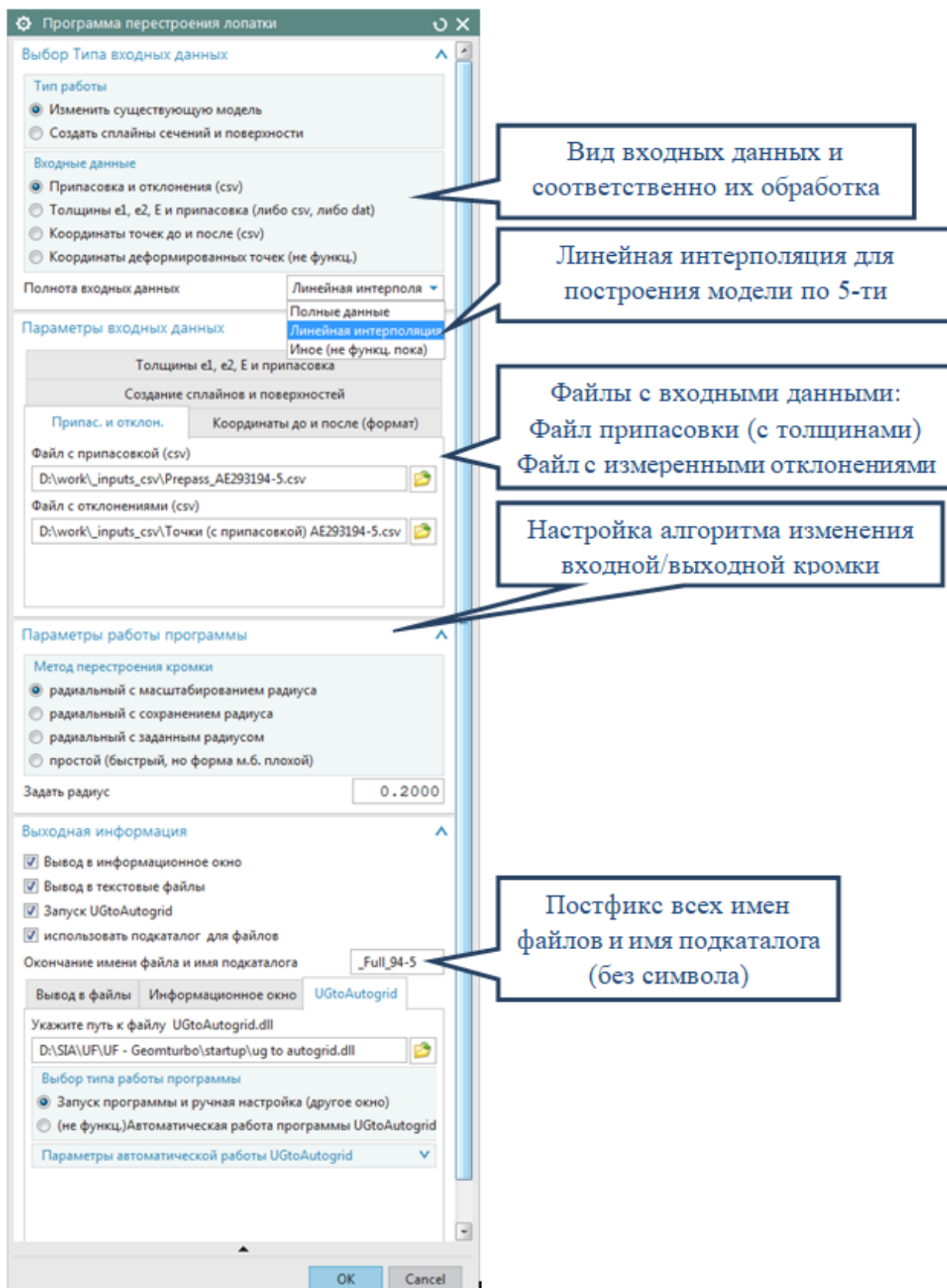


Рисунок 3.4 – Интерфейс меню программы «BladeToolMAI»

Для обеспечения корректной работы программного комплекса входные данные предоставляются в виде файла формата CSV, структурированного в соответствии с требованиями обработки геометрической информации. Данный файл содержит измеренные параметры,

характеризующие геометрические отклонения трех нормальных сечений лопатки, расположенных на фиксированных высотах (45%, 75% и 90% высоты). Перечень включенных параметров определен на основании результатов корреляционного анализа, представленного в Главе 2.

Указанные данные являются ключевыми для выполнения коррекции геометрии лопатки в рамках реализуемых алгоритмов модификации и обеспечивают достаточную информативность при ограниченном объеме измерительных данных. Примеры структурированных CSV-файлов с входными данными приведены на рисунке 3.5.

	A	B	C	D	E	F	G
1	CMM DATA SHEET						
2	QC checké Горбунков Н.В.						
3	Detal Cod 366-000-706-0						
4	Serial No. AE293387-F						
5							
6	Type	Label	Specification				
7			Nominal	#ИМЯ?	#ИМЯ?	Actual	Dev
8	4 Alignment Info						
9		Tx	0	-0.6	0.6	-0.0551	-0.0551
10		Ty	0	-0.6	0.6	0.0561	0.0561
11		Rz	0°00'00"	-0°33'00"	0°33'00"	-0°08'46"	-0°08'46"
12							
13							
14	6 Alignment Info						
15		Tx	0	-0.4	0.4	-0.2177	-0.2177
16		Ty	0	-0.4	0.4	0.0124	0.0124
17		Rz	0°00'00"	-0°33'00"	0°33'00"	-0°07'23"	-0°07'23"
18							
19							
20	8 Alignment Info						
21		Tx	0	-0.4	0.4	-0.171	-0.171
22		Ty	0	-0.4	0.4	0.0076	0.0076
23		Rz	0°00'00"	-0°33'00"	0°33'00"	-0°05'22"	-0°05'22"
24							
25							
26	10 Alignment Info						
27		Tx	0	-0.4	0.4	-0.3738	-0.3738
28		Ty	0	-0.4	0.4	0.6773	0.6773
29		Rz	0°00'00"	-0°33'00"	0°33'00"	0°17'45"	0°17'45"
30							
31							
32	15 Alignment Info						
33		Tx	0	-0.45	0.45	-0.2003	-0.2003
34		Ty	0	-0.45	0.45	0.0681	0.0681
35		Rz	0°00'00"	-0°33'00"	0°33'00"	-0°05'48"	-0°05'48"

а)

б)

Рисунок 3.5 – Пример файлов с входными данными

(а – данные совместной припасовки сечений; б – данные геометрических отклонений профиля лопатки)

Функционирование программного комплекса «BladeToolMAI» базируется на реализации последовательности геометрических операций, направленных на построение модифицированной твердотельной модели лопатки:

1. Представление результирующей модели  $S^*$  в виде композиции элементарных геометрических объектов, объединенных операцией сшивания объемов (3.1):

$$S^* = [A + B^* + C], \quad (3.1)$$

где

1)  $[\cdot]$  – операция топологического объединения (сшивания) трехмерных тел с обеспечением непрерывности границ;

2)  $A$  – модель замка лопатки с ножкой (см. Рисунок 3.6);

3)  $B^*$  – модифицированная геометрия пера лопатки, ограниченная с одной стороны плоскостью P1, а с другой – поверхностью T1 (см. Рисунок 3.7);

4) C – промежуточный соединительный элемент (проставка), обеспечивающий геометрическую согласованность между отрезанным пером  $B^*$  и замком с ножкой A.

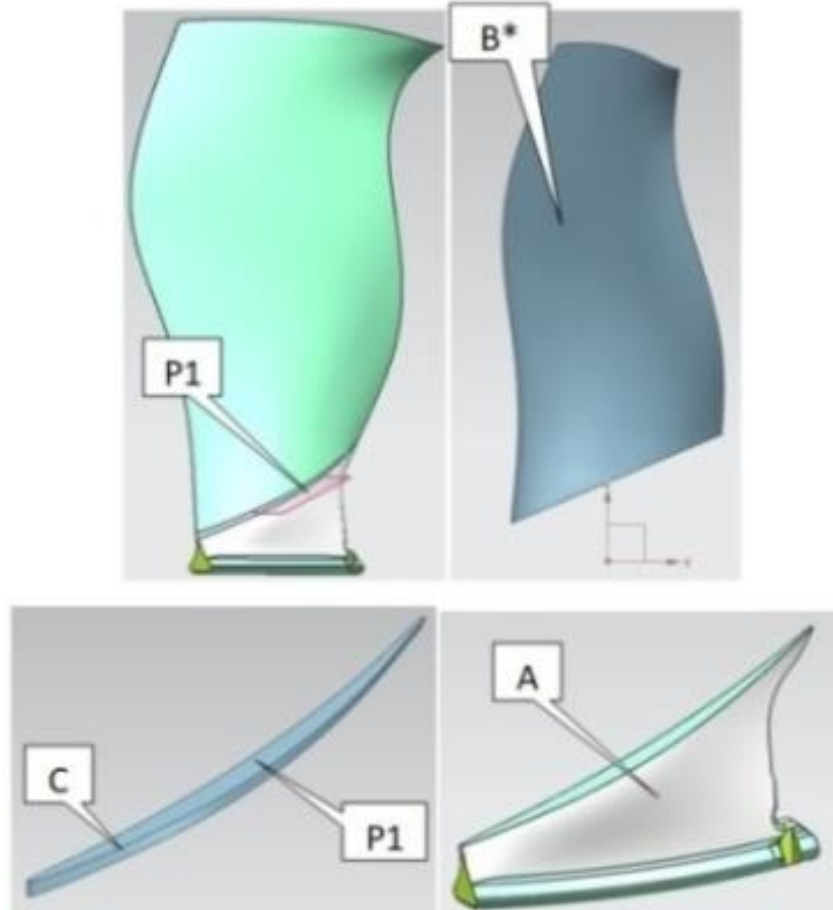


Рисунок 3.6 – Составные части модели лопатки

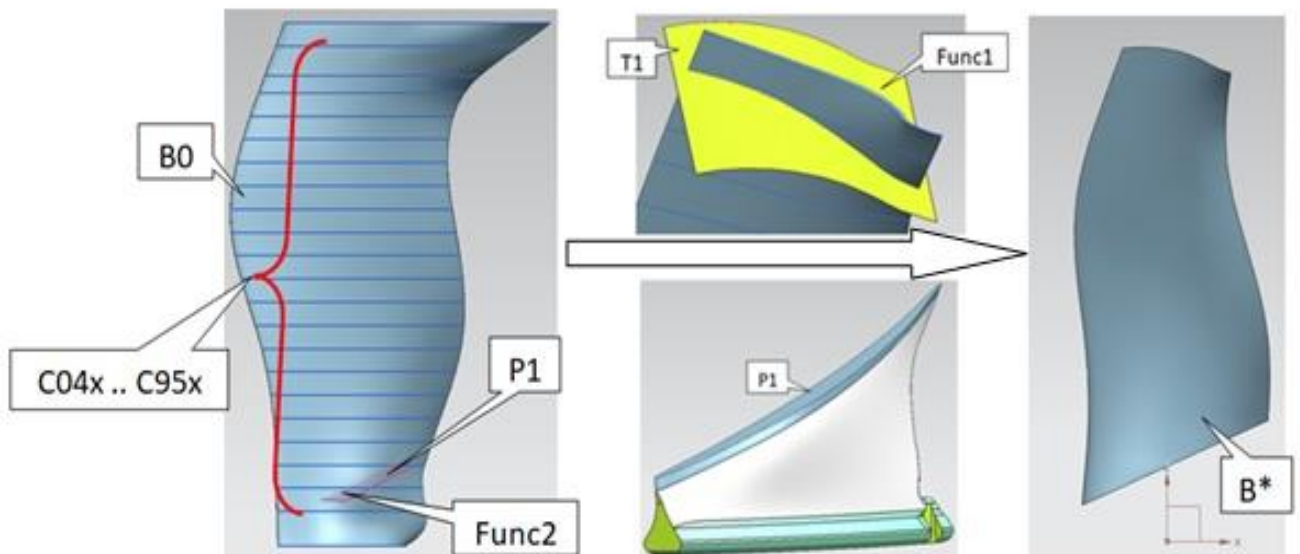


Рисунок 3.7 – Удлиненное и отрезанное перо лопатки, сплайны сечений и поверхности для операций отрезки

2. Реконструкция геометрии пера лопатки с учетом измеренных данных выполняется посредством последовательного применения параметризованных геометрических операций и описывается следующим выражением (3.2):

$$B^* = Func1 (Func2 (B0, P1) T1), \quad (3.2)$$

где

1)  $Func1$  – аналогичная геометрическая операция, предназначенная для обрезки верхней части пера по поверхности  $T1$ ;

2)  $Func2$  – операция булевой разности или усечения, обеспечивающая отсечение нижней части пера по плоскости  $P1$ ;

3)  $B0 = \{S1^* + S2^* + S3^* + S4^* + S5 + S6\}$  – исходная модель полного пера лопатки, формируемая путем объединения шести геометрических поверхностей с использованием операции сшивания в единую объемную структуру;

$\{\cdot\}$  – операция сшивания поверхностей в объем;

4)  $P1$  – фиксированная плоскость, используемая для отсечения нижней грани пера;

5)  $T1$  – заданная поверхность, определяющая контур верхнего торца пера и служащая для формирования верхней контактной грани.

3. Поверхности  $S1-S4$  представляют собой параметрические оболочки, аппроксимирующие спинку, корыто и боковые кромки пера. Каждая из них строится по методу сетки кривых и формализуется следующим образом (3.3):

$$Sx = Func3 (C1x, \dots, C30x, Ki, Kj), x = 1 \dots 4, \quad (3.3)$$

где

1)  $Func3$  – операция построения гладкой параметрической поверхности по регулярной сетке кривых, обеспечивающая непрерывность формы и высокую степень аппроксимации;

2)  $C1x, \dots, C30x$  – набор сплайновых кривых, аппроксимирующих профили сечений по высоте лопатки для соответствующей области (спинка, корыто, входная и выходная кромки);

3)  $Ki, Kj$  – вертикальные направляющие сплайны, проходящие вдоль кромок и определяющие топологическую структуру поверхности.

Поверхности  $S5$  и  $S6$  формируются на основе замыкающих контуров – четырех сплайновых петель, расположенных соответственно на верхнем торце и нижней грани пера, и предназначены для обеспечения замкнутости объемной модели и корректного соединения с соседними элементами (замком и проставкой).

4. Генерация сплайнов по дискретным измерительным точкам выполняется с применением интерполяционного метода. Модифицированная кривая  $C1x^*$  определяется как (3.4):

$$C1x^* = Func4(p1^*, p2^*, \dots, p30^*), \quad (3.4)$$

где

1) Func4 – функция построения гладкого сплайна (B-сплайна или NURBS), обеспечивающая высокую степень точности воспроизведения формы профиля по экспериментальным данным;

2)  $p1^*, \dots, p30^*$  – совокупность пространственных точек, скорректированных с учетом измеренных геометрических отклонений.

5. Коррекция положения измерительных точек по нормали к локальной поверхности выполняется с целью учета локальных отклонений формы профиля относительно номинальной геометрии. Новое положение точки  $p1^*$  определяется выражением (3.5):

$$p1^* = p1^{**} + dp, \quad (3.5)$$

где

1)  $p1^{**}$  - предварительно припасованная точка, полученная после глобального смещения и поворота сечения;

2)  $dp$  – вектор отклонения, направленный по нормали к номинальной (или текущей) поверхности в данной точке, величина которого определяется на основе результатов измерений. Данный этап обеспечивает точное воспроизведение локальных дефектов формы, выявленных при контроле.

6. Глобальная коррекция положения точек сечения производится в соответствии с параметрами припасовки, включающими линейные смещения и угловые повороты (3.6):

$$p1^{**} = (p1 + Tx + Ty) * Rz, \quad (3.6)$$

где

1)  $Tx$  и  $Ty$  – векторы смещения центра тяжести сечения в плоскости профиля;

2)  $Rz$  – матрица поворота, соответствующая угловому отклонению  $\Theta$  ( $\Delta\Theta$ ) вокруг оси, перпендикулярной плоскости сечения. Данная операция обеспечивает привязку текущего сечения к реальному положению в пространстве, зафиксированному при измерениях.

7. Моделирование поверхности проставки осуществляется автоматически на этапе объединения модифицированных компонентов пера лопатки и замка с ножкой в САД-системе. В процессе операции сшивания объемов система формирует переходную поверхность (проставку), обеспечивающую геометрическую непрерывность и топологическую корректность соединения. При этом форма проставки адаптируется к текущей конфигурации стыкуемых элементов без необходимости ручного вмешательства, что повышает степень автоматизации процесса геометрического моделирования.

### 3.1.2 Результаты построения параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы

Результатом функционирования программного комплекса «BladeToolMAI» является полностью перестроенная твердотельная модель лопатки вентилятора, адаптированная к реальной геометрии, полученной по данным координатно-измерительных мероприятий (см. Рисунок 3.8). Модель отражает учет всех зафиксированных отклонений формы, положения и ориентации сечений, что обеспечивает ее соответствие фактическому состоянию детали.



Рисунок 3.8 – Общий вид параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы

Помимо геометрической модели, программа формирует структурированный массив выходных данных, содержащий детализированную информацию по всем нормальным сечениям лопатки:

1. Номера сечений по высоте лопатки, упорядоченные в соответствии с конструктивной нумерацией.
2. Номера контрольных точек, расположенных на характерных линиях профиля – спинке, корыте, входной и выходной кромках.
3. Начальные координаты контрольных точек в номинальной системе координат  $[X, Y, Z]$ .
4. Координаты точек после выполнения операции припасовки сечения  $[X1, Y1, Z1]$ , учитывающей смещение центра тяжести и поворот профиля.
5. Величины локальных отклонений формы по нормали к номинальной поверхности для каждой контрольной точки – параметр, отражающий разницу между измеренной и номинальной геометрией.
6. Векторы приращений координат точек  $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]$ , обусловленные совокупным воздействием геометрических отклонений и корректировок при моделировании.
7. Таблицы значений толщин профиля вблизи входной ( $e1$ ) и выходной ( $e2$ ) кромок по всем сечениям.

8. Таблицу значений максимальной толщины профиля  $E$  в каждом сечении.

Сформированный набор данных является полноценным цифровым представлением геометрии лопатки, пригодным для последующего анализа, валидации, а также использования в составе автоматизированных систем технологической подготовки производства, контроля качества и аэродинамического моделирования. Предоставление информации в структурированном виде обеспечивает высокую степень прозрачности и воспроизводимости результатов геометрической модификации.

Для оценки качества построенных параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы был выполнен детальный анализ геометрической адекватности полученных моделей. Оценка осуществлялась путем сопоставления модифицированных моделей, сформированных с использованием макроса «BladeToolMAI» на основе данных координатно-измерительных мероприятий, с номинальной (конструкторской) моделью.

Критерием геометрического соответствия выбрана карта отклонений – визуализированное поле локальных разностей между реальной (измеренной) и номинальной поверхностями, представленное в цветовой шкале. Карта отклонений обеспечивает возможность как количественной, так и качественной оценки степени искажения геометрической формы лопатки по всей ее поверхности, а также позволяет идентифицировать зоны с максимальными отклонениями, находящимися в пределах установленных допусков.

В качестве примера на рисунке 3.9 приведена карта отклонений измеренной модели лопатки относительно номинальной. Для поверхности спинки (см. Рисунок 3.9, а) зафиксирован диапазон отклонений в пределах  $\delta = -1,72/+0,28$  мм, что свидетельствует о значительной систематическом утоньшении профиля в ряде сечений. Для поверхности корыта (см. Рисунок 3.9, б) диапазон составляет  $\delta = -0,03/+1,64$  мм, указывая на преимущественное утолщение формы по сравнению с номиналом.

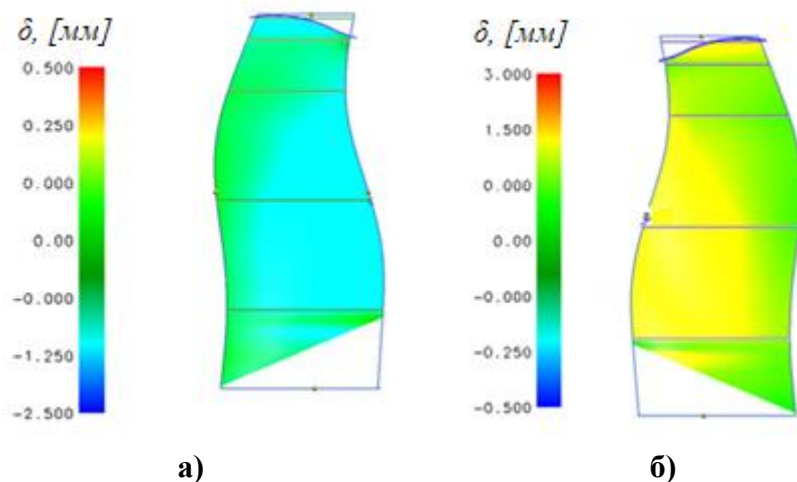


Рисунок 3.9 – Карта отклонений измеренной модели лопатки относительно номинальной (а – поверхность спинки; б – поверхность корыта)

Проведенный сравнительный анализ геометрических форм выявил устойчивые закономерности в распределении отклонений: наибольшие искажения профиля локализованы в периферийных и средних сечениях лопатки. Указанные особенности, по всей вероятности, обусловлены влиянием технологических факторов, действующих на этапе бесприпусковой штамповки заготовок лопаток.

Выявленные геометрические отклонения могут оказывать существенное влияние на аэродинамические характеристики проточной части компрессора. В первую очередь, это касается таких параметров, как массовый расход воздуха  $G_v$ , степень повышения давления  $\pi_k^*$ , тяга  $P$ , а также коэффициент газодинамической устойчивости (ГДУ). Таким образом, учет реальной геометрии на этапе параметрического моделирования позволяет повысить достоверность последующих расчетных исследований и обеспечивает более точное прогнозирование эксплуатационных характеристик двигателя [117, 118].

Таким образом, с использованием разработанного макроса «BladeToolMAI» в среде CAD-системы было сформировано 37 параметризованных 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора, соответствующих «холодной» геометрии и характеризующихся единичными предельными отклонениями по ключевым геометрическим параметрам. Данный набор моделей предназначен для проведения анализа чувствительности влияния отдельных геометрических факторов на прочностные и аэродинамические характеристики лопатки вентилятора.

В качестве исследуемых параметров выступали геометрические отклонения, наиболее значимые с точки зрения технологической вариативности и эксплуатационной надежности, выбранные в процессе разработки методики контрольно-измерительных мероприятий профиля пера лопаток вентилятора (см. Выводы по Главе 2, п.2).

Моделирование выполнялось на основе данных по трем характерным сечениям (45%, 75% и 90% высоты), при этом геометрия промежуточных сечений восстанавливалась методом линейной интерполяции с учетом конструктивно-геометрической непрерывности формы пера лопатки. Такой подход обеспечивает баланс между точностью воспроизведения реальной геометрии и вычислительной эффективностью при организации серии параметрических расчетов.

Перечень варьируемых параметров и диапазоны их изменения приведены в таблице 3.1. Полученные модели легли в основу последующего численного исследования чувствительности прочностных характеристик к геометрическим неопределенностям, присущим реальным деталям.

Таблица 3.1 – Перечень исследуемых параметрических 3D-моделей лопаток вентилятора

№ п/п	Имя лопатки	Номер сечения	Изменяемый параметр
1	0_nominal	-	-
2	1_min	45	Tx-0,4
3	2_min	75	Tx-0,5
4	3_min	90	Tx-1,0
5	4_min	45	Ty-0,4
6	5_min	75	Ty-0,5
7	6_min	90	Ty-1,0
8	7_min	45	Θ-0,55°
9	8_min	75	Θ-0,55°
10	9_min	90	Θ-0,55°
11	10_min	45	E-0,25
12	11_min	75	E-0,25
13	12_min	90	E-0,25
14	13_min	45	e1-0,1
15	14_min	75	e1-0,1
16	15_min	90	e1-0,1
17	16_min	45	e2-0,3
18	17_min	75	e2-0,3
19	18_min	90	e2-0,3
20	1_max	45	Tx+0,4
21	2_max	75	Tx+0,5
22	3_max	90	Tx+1,0
23	4_max	45	Ty+0,4
24	5_max	75	Ty+0,5
25	6_max	90	Ty+1,0
26	7_max	45	Θ+0,55°
27	8_max	75	Θ+0,55°
28	9_max	90	Θ+0,55°
29	10_max	45	E+0,25
30	11_max	75	E+0,25
31	12_max	90	E+0,25
32	13_max	45	e1+0,1
33	14_max	75	e1+0,1
34	15_max	90	e1+0,1
35	16_max	45	e2+0,3
36	17_max	75	e2+0,3
37	18_max	90	e2+0,3
			<b>Итого: 37 моделей</b>

Реализация данного подхода в программном комплексе «BladeToolMAI» обеспечивает автоматизированное построение твердотельной модели лопатки вентилятора, полностью адаптированной к ее фактической геометрии на основе данных координатно-измерительных мероприятий. Полученная модель корректно отражает все зафиксированные отклонения формы, положения и ориентации профильных сечений, что гарантирует ее соответствие реальному техническому состоянию изделия и повышает достоверность последующих расчетных исследований.

### **3.2 Методика создания параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «горячей» формы**

«Холодная» форма лопатки, реконструируемая на основе данных финишных контрольно-измерительных мероприятий, традиционно служит исходной базой для проектирования и анализа. Однако использование исключительно «холодной» геометрии при расчете аэродинамических характеристик может привести к значительным погрешностям, поскольку не учитывает реальные деформации, возникающие при работе двигателя. Это особенно критично на этапах аэродинамической оптимизации и прочностного анализа, где точное воспроизведение рабочей конфигурации лопатки является необходимым условием достоверности результатов.

Современные подходы к проектированию требуют перехода к параметрическим 3D-моделям, способным не только гибко адаптироваться к изменяющимся конструктивным параметрам, но и интегрировать результаты многодисциплинарных расчетов включая тепловые и силовые деформации, центробежные напряжения и аэродинамическое давление. Параметризация обеспечивает возможность проведения серийных расчетов, многовариантной оптимизации и существенного сокращения продолжительности цикла проектирования, повышая его адаптивность и эффективность. В контексте развития технологий цифрового двойника, параметрическая модель, отражающая «горячую» геометрию, становится ключевым элементом сквозного информационного сопровождения изделия на всех этапах жизненного цикла от концептуального проектирования до эксплуатации и технического обслуживания.

Таким образом, создание «горячих» моделей лопаток вентилятора, учитывающих реальные эксплуатационные деформации, представляет собой важное направление в повышении точности аэродинамического анализа и общей эффективности проектирования газотурбинных двигателей. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью обеспечения высокой достоверности расчетов, улучшения энергетических характеристик вентилятора, повышения ресурса лопаток и реализации требований к безопасности и надежности современных авиационных двигателей. Внедрение «горячих» моделей в практику проектирования способствует формированию более адекватной физической картины рабочего процесса и открывает возможности для дальнейшего совершенствования аэродинамических и прочностных характеристик лопаточных машин.

#### **3.2.1 Порядок построения параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «горячей» формы**

Формирование параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора в «горячей» конфигурации, отражающей их геометрию в условиях эксплуатационных нагрузок, осуществляется на основе результатов прочностных расчетов, выполненных для «холодной»

формы лопатки в разработанном программном комплексе «FindSweepLayers» интегрированном в среду CAE-системы ANSYS Workbench.

Методика построения параметрической 3D-модели «горячей» формы реализуется в рамках многоэтапной процедуры, включающей обработку конечно-элементных данных, параметризацию геометрии и реконструирование деформированной поверхности лопатки. Процесс может быть представлен следующими последовательными этапами:

1. Извлечение геометрических данных. На первом этапе с использованием специализированного программного макроса, разработанного в рамках автоматизированной среды, осуществляется извлечение координат узлов конечно-элементной модели по характерным сечениям пера лопатки. При этом формируются два набора данных: координаты узлов в недеформированном состоянии («холодная» геометрия) и координаты тех же узлов в деформированном состоянии, полученные в результате решения статической задачи. Указанные данные сохраняются в отдельных структурированных файлах для последующей обработки. Сечения предварительно классифицируются по функциональным зонам профиля: спинка, корыто, входная и выходная кромки, что обеспечивает детализированный контроль за изменением формы по всему профилю лопатки.

2. Аппроксимация геометрии с помощью сплайнов. На втором этапе производится построение гладких интерполяционных кривых – сплайнов по множеству точек, соответствующих деформированному состоянию. Аппроксимация выполняется с учетом требований к гладкости и непрерывности производных, что является критически важным для обеспечения корректности аэродинамических расчетов в последующих этапах. Использование сплайновой интерполяции позволяет минимизировать численные шумы и сохранить физическую адекватность формы профиля.

3. Реконструкция поверхностей профиля. На третьем этапе на основе построенных сплайновых сечений осуществляется генерация непрерывных трехмерных поверхностей, формирующих аэродинамический профиль пера лопатки. Поверхности строятся с применением методов продольного сшивания и NURBS-моделирования, что обеспечивает высокую точность воспроизведения геометрии и совместимость с САД-системами, используемыми в промышленном проектировании.

4. Объединение поверхностей в единую твердотельную модель. Завершающим этапом является операция сшивания отдельных поверхностей в единый объем, пригодный для дальнейшего использования в аэродинамических, прочностных и технологических расчетах. Полученная параметрическая модель «горячей» формы сохраняется в формате, поддерживаемом САЕ- и САД-платформами, что обеспечивает ее интеграцию в сквозные цифровые цепочки проектирования.

Представленная методика позволяет не только точно воспроизвести геометрию лопатки в условиях рабочих нагрузок, но и обеспечивает полную параметризацию модели, что открывает возможности для проведения итерационных расчетов, многодисциплинарной оптимизации и создания цифрового двойника лопатки. Блок-схема реализации данного алгоритма в программном комплексе «FindSweepLayers» приведена на рисунке 3.10 и отражает логическую последовательность преобразования конечно-элементных данных в параметрическую CAD-модель, пригодную для инженерного анализа и промышленного применения.

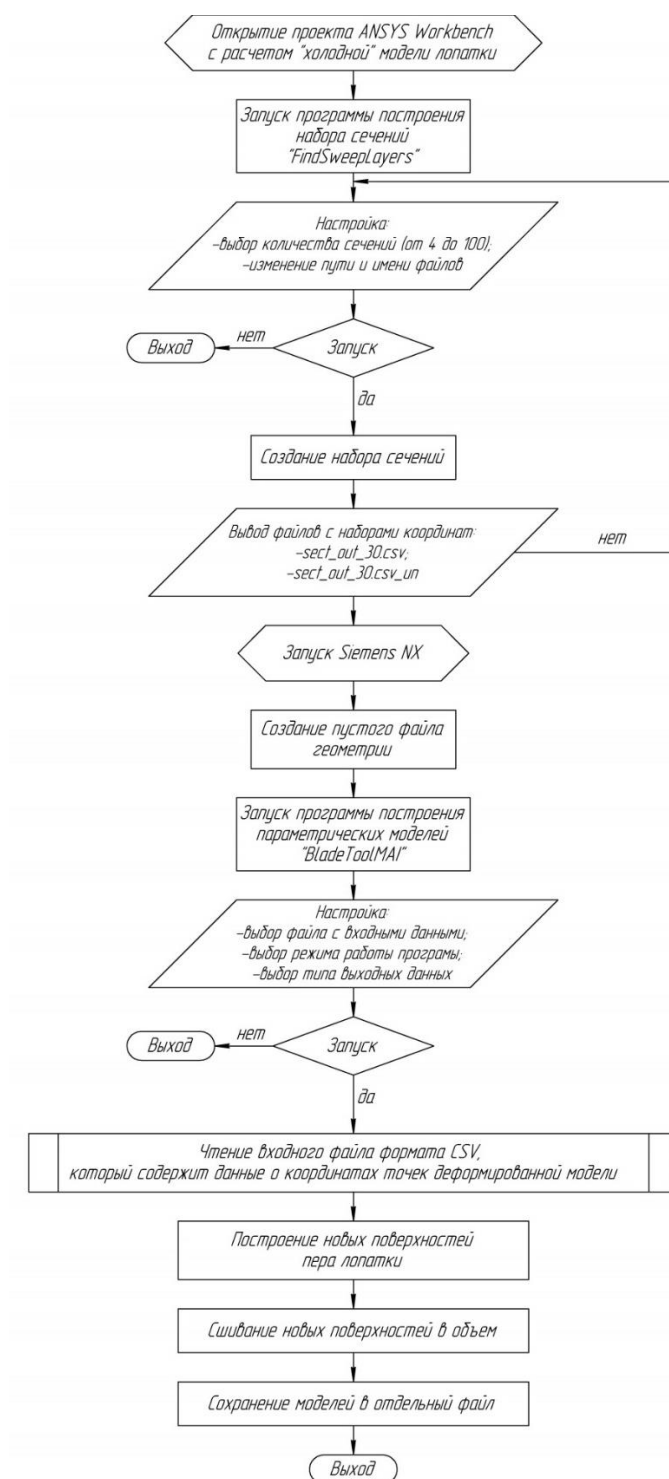


Рисунок 3.10 – Блок-схема программы «FindSweepLayers»

Таким образом, разработанный подход представляет собой научно обоснованную и технологически реализуемую методику, способствующую повышению достоверности аэродинамического моделирования и улучшению качества проектирования лопаток газотурбинных двигателей в условиях высоких эксплуатационных нагрузок.

Геометрические параметры, положенные в основу формирования параметрических 3D-моделей лопаток рабочего колеса вентилятора в «горячей» конфигурации, соответствуют совокупности конструктивных и аэродинамических характеристик, систематизированных в таблице 3.1. Указанные параметры включают в себя координаты профильных сечений по перу лопатки, углы установки, закрутку, толщины сечений, а также данные о форме входной и выходной кромок, необходимые для корректного воссоздания как номинальной («холодной»), так и деформированной («горячей») геометрии.

Как отмечалось ранее, для обеспечения автоматизированного перехода от результатов прочностного анализа к параметрической CAD-модели «горячей» формы была разработана специализированная программная реализация в виде скрипта под названием «FindSweepLayers». Данный инструмент реализован в среде ANSYS ACT (Application Customization Toolkit) и предназначен для извлечения и обработки узловых данных конечно-элементной модели, полученных на этапе статического расчета. Программа обеспечивает параметрическую согласованность между расчетной и геометрической моделью, что является необходимым условием для последующего использования в мультидисциплинарной оптимизации и создании цифрового двойника лопатки.

Рабочий процесс применения программы «FindSweepLayers» включает следующие этапы:

ЭТАП 1: Подготовка исходных данных в ANSYS Workbench.

– Шаг 1.1: Открытие проекта ANSYS Workbench:

- запускается проект ANSYS Workbench, содержащий уже выполненный расчет «холодной» модели лопатки;
- в этом проекте должны быть доступны результаты расчета НДС при рабочих условиях (температура, давление, обороты);
- важно: расчет должен включать геометрическую нелинейность, если деформации значительны, чтобы корректно получить координаты узлов после деформации.

– Шаг 1.2: Экспорт координат деформированных узлов:

- из результатов расчета экспортируются координаты всех узлов поверхности лопатки (или ключевых сечений) после деформации;
- формат экспорта – CSV или TXT файлы, где каждая строка содержит: X, Y, Z координаты узла + возможно номер узла/сечения;

- полученные данные будут использоваться как входные для построения новой геометрии.

### ЭТАП 2: Генерация набора сечений с помощью программы FindSweepLayers.

– Шаг 2.1: Запуск программы FindSweepLayers:

- программа предназначена для автоматического выделения сечений лопатки по заданным параметрам.

Фрагмент программы «FindSweepLayers» представлен на рисунке 3.11.

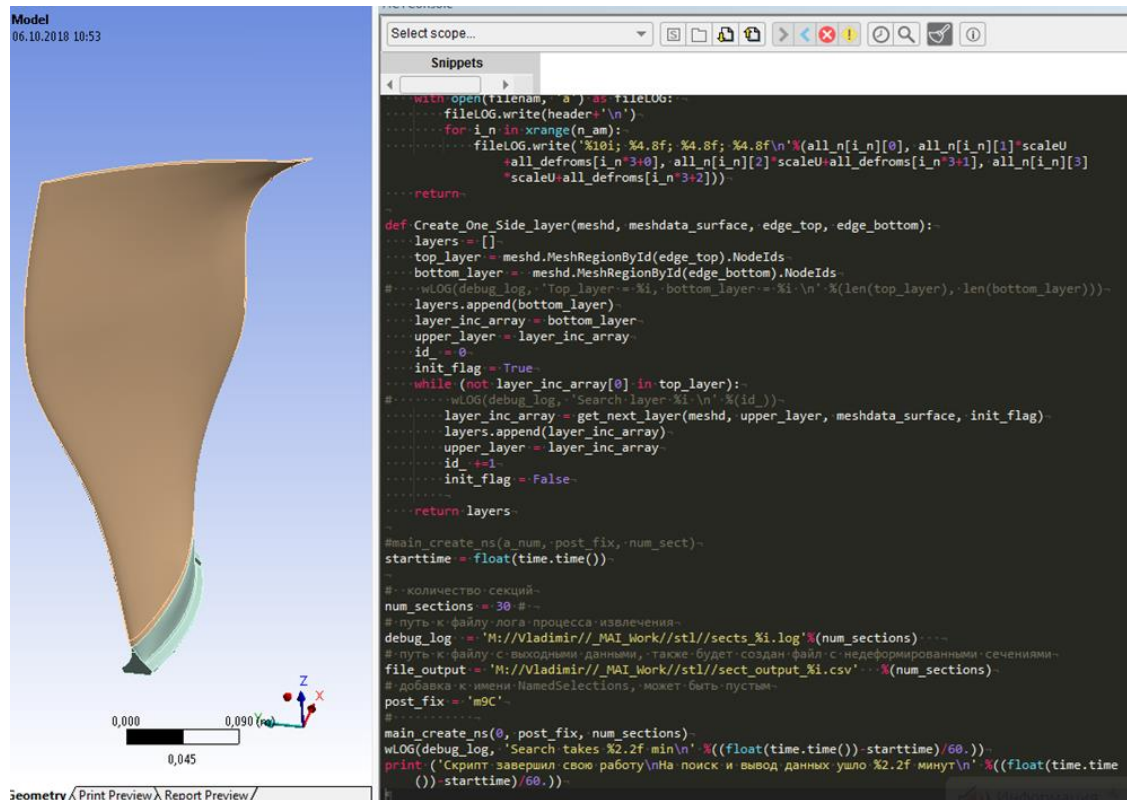


Рисунок 3.11 – Фрагмент программы «FindSweepLayers» в окне ACT Console

– Шаг 2.2: Настройка параметров:

- пользователь задает:
  - количество сечений (от 4 до 100) – чем больше, тем точнее будет модель;
  - путь к файлам и имена выходных файлов (например, `_sect_out_30.csv`, `_sect_out_30.csv_un`):

Пример структуры выходных файлов представлен на рисунке 3.12

sect_output_7.csv		sect_output_7.csv_un	
1	[Source:deform_blades_2_VV_2,2model]	2	[s-1]
2	[s-1]	3	33844; 247.76204890; 18.66476207; 194.31631111
3	33844; 247.81096439; 18.66476207; 194.31631111	4	33845; 248.54486929; 16.84735624; 194.58579104; 0.04891549; 0.05769497; 0.06281217
4	33845; 248.59230178; 16.90491891; 194.64433031	5	33846; 249.60711585; 15.32659105; 195.03669026; 0.04454578; 0.05706374; 0.05853928
5	33846; 249.65291580; 15.38365479; 195.09385025	6	33847; 250.87154342; 14.01625196; 195.57341800; 0.04454578; 0.05643763; 0.05682496
6	33847; 250.91608920; 14.07268959; 195.63023496	7	33848; 252.28548456; 12.85326997; 196.17359435; 0.04336923; 0.05581883; 0.05691805
7	33848; 252.32885379; 12.90908880; 196.23051240	8	33849; 253.81566470; 11.75507246; 196.82311918; 0.04222967; 0.05528722; 0.05733718
8	33849; 253.85789438; 11.81035967; 196.88045636	9	33850; 255.44293124; 10.66506169; 197.51385476; 0.04113490; 0.05488789; 0.05777717
9	33850; 255.48406614; 10.71994959; 197.57163193	10	33851; 257.14841722; 9.57434785; 198.23779255; 0.03900282; 0.05435686; 0.05833141
10	33851; 257.18847471; 9.62891781; 198.29612396	11	33852; 258.91876354; 8.49176595; 198.98926197; 0.03787412; 0.05407381; 0.05990975
11	33852; 258.95776636; 8.54612281; 199.04822465	12	33853; 260.71803766; 7.44905408; 199.75301054; 0.03677781; 0.05379177; 0.06087965
12	33853; 260.75591178; 7.50312789; 199.81292029	13	33854; 262.54074970; 6.45367416; 200.52670795; 0.03571512; 0.05356907; 0.06184126
13	33854; 262.57752751; 6.50746593; 200.58758760	14	33855; 264.37890614; 5.49224214; 201.30696117; 0.03463689; 0.05327064; 0.06299464
14	33855; 264.41462126; 5.54581121; 201.36880243	15	33856; 266.22353964; 4.54567482; 202.08996383; 0.03353130; 0.05292995; 0.06409389
15	33856; 266.25817653; 4.59804546; 202.15295847	16	33857; 268.07294669; 3.61016219; 202.87499283; 0.03241182; 0.05254429; 0.06522182
16		17	33858; 269.9288923; 2.68905029; 203.66276211; 0.03128996; 0.05205686; 0.06646828
		18	33859; 271.79547953; 1.79566423; 204.45511916; 0.03018998; 0.05152871; 0.06772065
		19	33860; 273.67940542; 0.94523819; 205.25480085; 0.02917244; 0.05092068; 0.06908646
		20	33861; 275.57950401; 0.13831253; 206.06134755; 0.02770849; 0.05025271; 0.07053301
		21	33862; 277.49172748; -0.63390637; 206.87304107; 0.02650358; 0.04956464; 0.07206634
			33863; 279.41391251; -1.37638839; 207.68896313; 0.02550358; 0.04956464; 0.07206634

а)

б)

Рисунок 3.12 – Файлы с результатами работы программы «FindSweepLayers»

(а – основной файл с координатами сечений; б – файл с неупорядоченными или необработанными данными (для проверки или резервного копирования))

– Шаг 2.3: Запуск генерации сечений (см. Рисунок 3.13):

- после настройки запускается процесс создания набора сечений;
- результат – файлы CSV, содержащие координаты точек каждого сечения лопатки в деформированном состоянии.

The screenshot displays the ANSYS R19.2 interface during the section generation process. The top window shows a log file 'sects\_7.log' with the following content:

```

1 Generate all faces
2 Find longest faces
3 Side s were analysed. Layers array contains 101 sets. It takes 1.16 min
4 Side k were analysed. Layers array contains 101 sets. It takes 1.05 min
5 Side i were analysed. Layers array contains 101 sets. It takes 0.00 min
6 Side o were analysed. Layers array contains 101 sets. It takes 0.01 min
7 Named Selections for Layer nl_1_7_s_test was created
8 Side [s-1] were saved. It takes 0.10 sec
9 Named Selections for Layer nl_2_7_s_test was created
10 Side [s-2] were saved. It takes 0.06 sec
11 Named Selections for Layer nl_3_7_s_test was created
12 Side [s-3] were saved. It takes 0.05 sec
13 Named Selections for Layer nl_4_7_s_test was created
14 Side [s-4] were saved. It takes 0.05 sec
15 Named Selections for Layer nl_5_7_s_test was created
16 Side [s-5] were saved. It takes 0.05 sec

```

The bottom window shows the 'Outline' tree with a list of sections (nl\_10\_25\_s to nl\_25\_25\_s) and a 3D model of the blade with these sections highlighted in pink. A 'Details of Multiple Selection' panel is also visible, showing 'Scope: Geometry Selection, 217 Nodes'.

Рисунок 3.13 – Процесс генерации сечений лопатки вентилятора к конечно-элементной модели

ЭТАП 3: Построение параметрической модели в Siemens NX с помощью BladeToolMAI.

– Шаг 3.1: Запуск Siemens NX:

- открывается среда CAD Siemens NX (версия должна поддерживать параметрическое моделирование и импорт CSV).

– Шаг 3.2: Создание пустого файла геометрии:

- создается новый \*.prt файл (или аналогичный формат NX), в котором будет строиться модель лопатки.

– Шаг 3.3: Запуск программы BladeToolMAI:

- это специализированный модуль, предназначенный для параметрического построения лопаток по данным сечений;
- программа читает входные данные (CSV-файлы из предыдущего этапа) и строит поверхность лопатки путем интерполяции между сечениями.

– Шаг 3.4: Настройка параметров BladeToolMAI (см. Рисунок 3.14):

- пользователь выбирает:
  - входной файл с данными (например, \_sect\_out\_30.csv);
  - режим работы программы (например, «построение по сечениям», «автоматическая гладкость», «учет толщины»);
  - тип выходных данных (например, B-spline поверхность, NURBS, полигональная сетка).

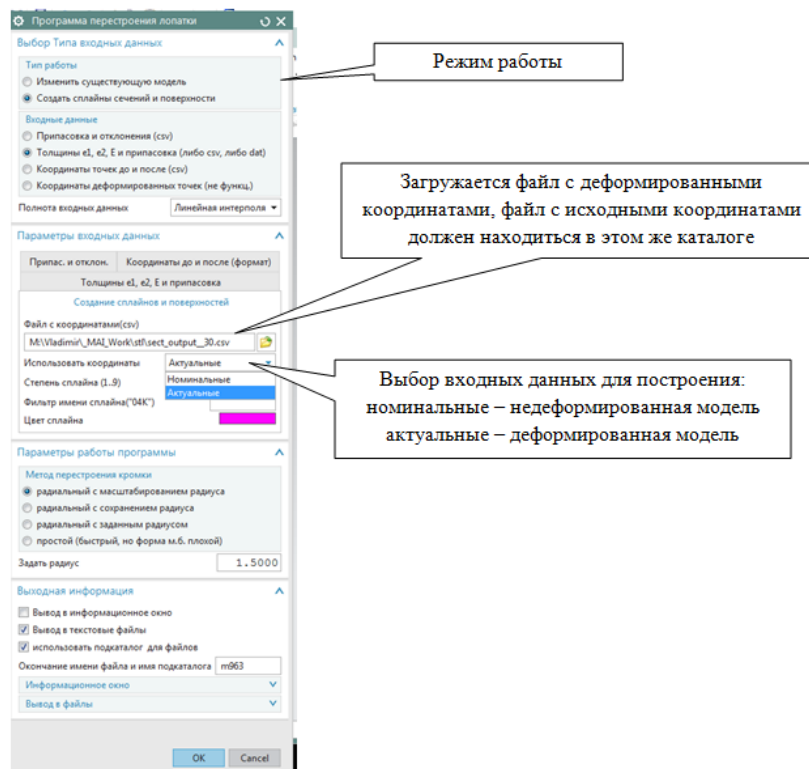


Рисунок 3.14 – Настройки программы «BladeToolMAI» для создания параметрических моделей лопаток «горячей» формы

– Шаг 3.5: Запуск построения модели:

- после подтверждения настроек запускается процесс построения;
- программа выполняет следующие действия:
  - чтение CSV-файла с координатами точек деформированной модели;
  - построение новых поверхностей пера лопатки на основе этих точек (интерполяция, аппроксимация);
  - сшивание поверхностей в единое тело (volume/solid body);
  - сохранение результата в отдельный файл (например, hot\_blade\_v1.prt).

В качестве иллюстрации разработанной методики на рисунке 3.15 представлен общий вид сформированной параметрической 3D-модели рабочей лопатки вентилятора «горячей» формы в сравнении с «холодной». Модель характеризуется высокой степенью геометрической детализации, непрерывностью поверхности и корректным воспроизведением профильной формы по всему размаху лопатки, что подтверждает эффективность реализованного алгоритма геометрической реконструкции.

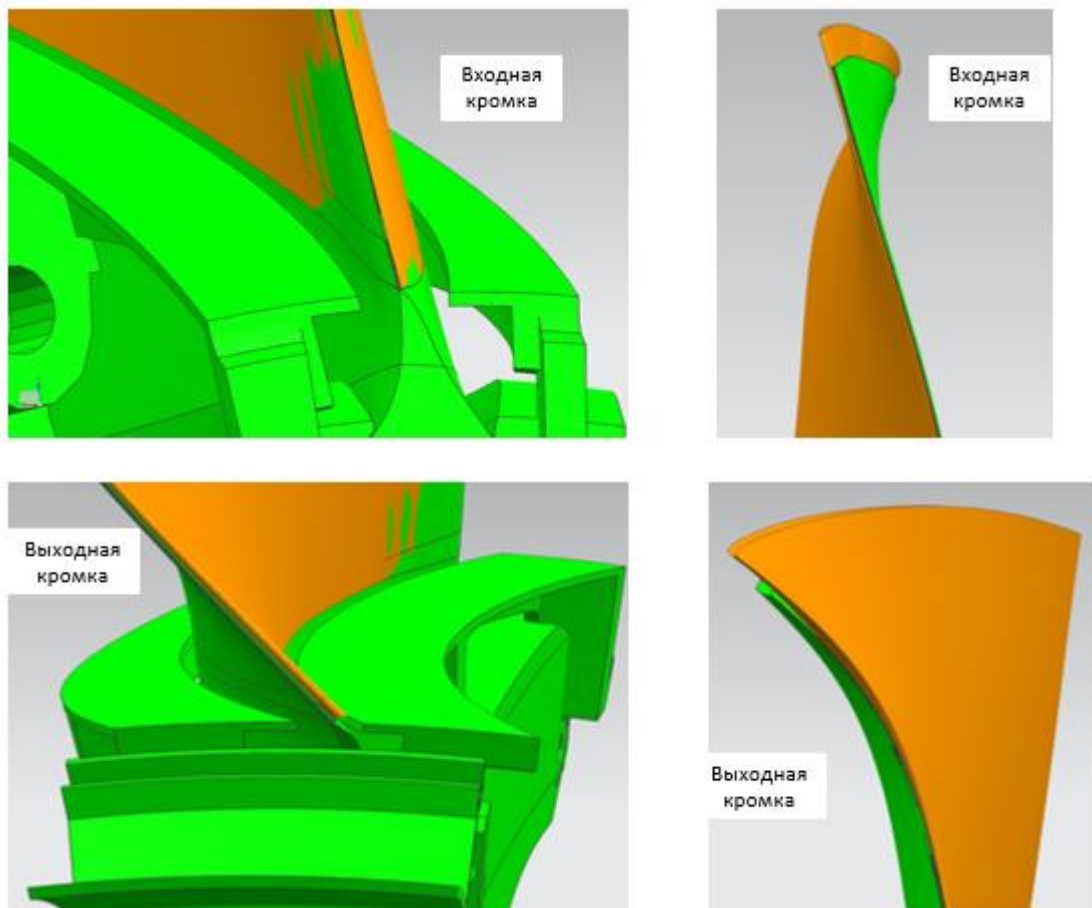


Рисунок 3.15 – Общий вид параметрической 3D-модели лопатки «горячей» формы (зеленая – «холодная» модель лопатки; оранжевая – «горячая» модель лопатки)

ЭТАП 4: Валидация и использование горячей модели.

– Шаг 4.1: Проверка геометрии:

- визуальный контроль в NX: отсутствие разрывов, правильность формы, соответствие ожидаемым деформациям;
- при необходимости – сравнение с «холодной» моделью для оценки величины деформаций.

– Шаг 4.2: Экспорт модели:

- Готовая горячая модель сохраняется в формате, подходящем для дальнейших задач:
  - для CFD: STEP, IGES, Parasolid;
  - для FEM: тот же STEP или нативный формат NX;
  - для САМ: STL, STEP.

– Шаг 4.3: Интеграция в рабочий процесс:

- Модель может быть использована для:
  - повторного прочностного расчета (уже с учетом реальной формы);
  - аэродинамического расчета (CFD) с учетом изменения профиля;
  - изготовления опытного образца.

Таким образом, программный инструмент «FindSweepLayers» обеспечивает прецизионное преобразование результатов численного анализа в структурированный геометрический формат, пригодный для дальнейшей параметризации и реконструкции 3D-модели. Его внедрение позволяет существенно повысить степень автоматизации процесса построения «горячих» моделей, снизить вероятность ручных ошибок и обеспечить воспроизводимость результатов в рамках сквозного проектирования.

### **3.2.2 Результаты построения параметрических 3D-моделей рабочей лопатки вентилятора «горячей» формы**

На основе разработанных программных инструментов «FindSweepLayers» и «BladeToolMAI» реализована серия параметрических 3D-моделей рабочих лопаток вентилятора в «горячей» форме, отражающих их геометрию в условиях эксплуатационных нагрузок. В общей сложности сформировано 37 «горячих» моделей, каждая из которых соответствует единичному предельному отклонению одного из ключевых геометрических параметров при сохранении номинальных значений остальных. Такой подход позволяет провести систематический анализ влияния отдельных геометрических неопределенностей на аэродинамические и прочностные характеристики лопатки в реальном рабочем состоянии.

Построение моделей выполнено по трем характерным сечениям, расположенным по высоте лопатки: сечение 45%, 75% и 90% высоты, определенным в соответствии с принятой системой параметризации профиля. Между указанными сечениями геометрия интерполируется линейным образом, что обеспечивает достаточную точность при сохранении вычислительной эффективности и соответствует требованиям к моделированию.

Сформированные модели охватывают диапазон типичных производственных и эксплуатационных отклонений, позволяя оценить чувствительность аэродинамических характеристик к локальным и глобальным изменениям геометрии в рабочих режимах. Перечень варьируемых параметров и их предельные значения, реализованные в рамках модельной выборки, систематизированы и представлены в таблице 3.1.

Для последующего численного моделирования аэродинамических процессов на основе полученных геометрий «горячей» формы была разработана параметрическая модель газодинамического тракта вентилятора (см. Рисунок 3.16). Конструкция модели охватывает не только деформированную рабочую лопатку, но и сопряженные элементы проточной части: втулку ротора, внешний обтекатель и прилегающие участки входного и выходного каналов, обеспечивающие корректное задание граничных условий. Геометрия тракта построена с учетом точного воспроизведения межлопаточного канала, образованного профилями в «горячей» конфигурации, при сохранении номинальных значений радиальных и осевых зазоров, характерных для эксплуатационного состояния.

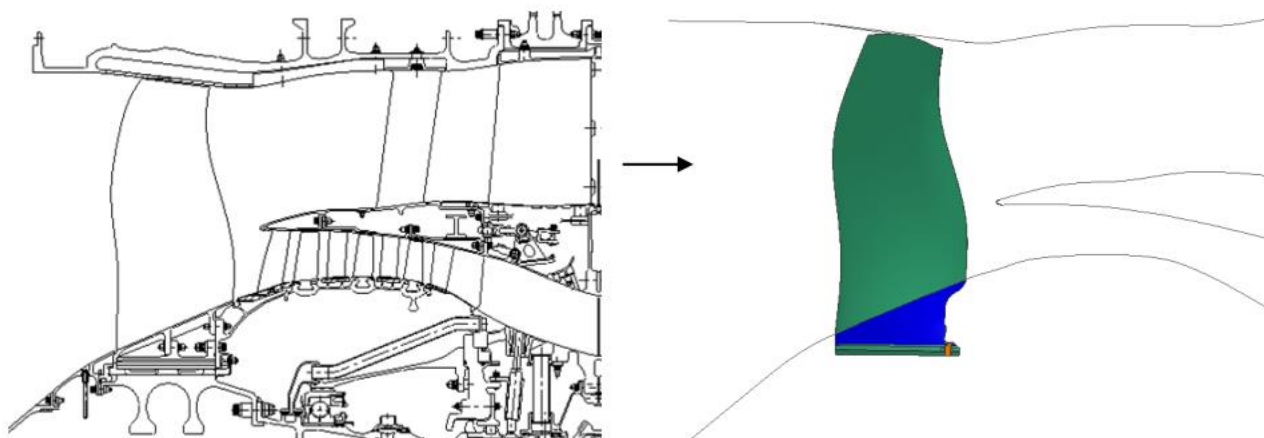


Рисунок 3.16 – Параметрическая модель газодинамического тракта вентилятора

Реализованная параметризация газодинамического тракта обеспечивает автоматическую адаптацию его геометрии к любому из 37 вариантов «горячей» формы лопатки, что позволяет проводить систематический анализ чувствительности аэродинамических характеристик к отдельным геометрическим отклонениям в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

Сформированные параметрические 3D-модели рабочих лопаток в «горячей» форме, учитывающие совместное влияние тепловых и центробежных деформаций, служат геометрической основой для трехмерного численного моделирования методами вычислительной гидро- и газодинамики (CFD). Целью расчетов является количественная оценка влияния деформированной геометрии на ключевые параметры течения в проточной части, включая поля давления и скорости, распределение потерь полного давления, а также характеристики устойчивости работы вентиляторной ступени.

Численное моделирование выполняется в полной трехмерной постановке с учетом всех релевантных физических эффектов, характерных для рабочих режимов газотурбинного двигателя: вращения ротора, сжимаемости рабочего тела, развитой турбулентности и, при необходимости, конвективного теплообмена между потоком и поверхностями проточной части. Особое внимание уделяется исследованию чувствительности интегральных аэродинамических показателей к геометрическим возмущениям, обусловленным технологическими допусками при изготовлении.

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

Разработана комплексная методика геометрической параметризации рабочих лопаток вентилятора, основанная на использовании аналитических зависимостей и топологических связей между элементами модели. Создан специализированный программный комплекс «BladeToolMAI», реализованный в среде CAD-системы Siemens NX, который обеспечивает автоматизированное построение твердотельных 3D-моделей лопаток по данным координатно-измерительных мероприятий. Программа поддерживает различные режимы реконструкции геометрии (полная и частичная модификация, интерполяция по характерным сечениям), что позволяет гибко адаптировать модель под имеющийся объем измерительной информации.

Реализован алгоритм формирования параметрических моделей лопаток в «холодном» состоянии, учитывающий реальные технологические отклонения формы профиля (смещение центра тяжести  $T_x, T_y$ , угол установки  $\Theta$ , толщины профиля  $E, e_1, e_2$ ). Сформирована база из 37 параметризованных моделей, соответствующих предельным значениям геометрических допусков в характерных сечениях (45%, 75%, 90% высоты). Проведенный анализ карт отклонений подтвердил высокую точность воспроизведения реальной геометрии изделий, выявив систематические искажения профиля, обусловленные технологией бесприпусковой штамповки.

Разработан программный модуль «FindSweepLayers» (интегрированный в ANSYS Workbench через АСТ), предназначенный для автоматического извлечения координат узлов деформированной конечно-элементной сетки после прочностного расчета. Предложена и

реализована сквозная технология перехода от результатов статического прочностного анализа (НДС) к параметрической САД-модели «горячей» формы. Технология включает аппроксимацию деформированных поверхностей сплайнами, реконструкцию профилей и сшивание их в единое твердое тело, что обеспечивает геометрическую непрерывность и пригодность моделей для последующего газодинамического моделирования.

На основе связки программных инструментов «FindSweepLayers» и «BladeToolMAI» создана серия из 37 параметрических 3D-моделей лопаток в «горячей» конфигурации, учитывающих совместное влияние центробежных, температурных и аэродинамических нагрузок на геометрию профиля с заданными производственными отклонениями. Построена параметрическая модель газодинамического тракта, автоматически адаптирующаяся к изменениям геометрии лопатки. Полученный набор моделей служит геометрической основой для проведения численных экспериментов по оценке чувствительности аэродинамических характеристик вентиляторной ступени к технологическим рассеяниям геометрии в условиях реальной эксплуатации.

Внедрение разработанных методов параметризации позволило создать замкнутый цикл «измерение – прочностной расчет – геометрическая реконструкция – аэродинамический анализ». Это устраняет разрыв между прочностными и газодинамическими расчетами, повышая достоверность прогнозирования эксплуатационных характеристик двигателя за счет учета реальных деформаций лопаток («горячие» модели) вместо использования идеализированной «холодной» геометрии.

## **ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СТУПЕНИ К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОТКЛОНЕНИЯМ ЛОПАТОК**

Оценка влияния производственных отклонений рабочих лопаток вентилятора на их деформации, необходимые для построения «горячих» моделей лопаток и прочностные характеристики требует проведения большого объема однотипных расчетов, число которых определяется количеством варьируемых геометрических параметров и уровнем детализации исследуемого факторного пространства. В связи с высокой трудоемкостью ручной подготовки расчетных моделей и необходимостью обеспечения воспроизводимости результатов, для автоматизации процесса моделирования применяется метод параметрического проектирования. Параметрическая модель лопатки вентилятора в «холодной» геометрии реализована в виде математически описанной конструкции, в которой ключевые геометрические параметры определены как управляющие переменные. Такой подход позволяет в автоматическом режиме генерировать серии расчетных проектов с варьируемой конфигурацией лопатки и сопряженных элементов конструкции, обеспечивая согласованность геометрических изменений, исключая вероятность ошибок при построении моделей [119].

Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток проведено с использованием программного комплекса ANSYS Workbench, который предоставляет интегрированную платформу для выполнения конечно-элементного анализа [120]. В рамках данной среды реализована комплексная автоматизация расчетного процесса, включающая параметризацию геометрии, управление сеточной дискретизацией, выполнение решателя и постобработку результатов, что существенно повышает эффективность проведения многовариантных исследований.

На базе установленных границ безопасной эксплуатации, в рамках данного исследования основной фокус смещен на определение статического напряженно-деформированного состояния лопаток. Результаты этого анализа являются исходными данными для формирования «горячей» геометрии профиля, необходимой для корректной оценки аэродинамических характеристик в рабочих режимах.

### **4.1 Прочностной расчет рабочих лопаток вентилятора «холодной» формы**

#### **4.1.1 Описание расчетной модели**

Расчетная модель для выполнения прочностного анализа представляет собой сектор рабочего колеса вентилятора, включающий рабочую лопатку, диск, замковое соединение, полку, участок ротора и элементы фиксирующего устройства (см. Рисунок 4.1). Учет влияния остальных

23 сектора колеса обеспечивается за счет применения условий циклической симметрии, наложенных на боковые грани выделенного сектора. Включение в модель полного набора конструктивных элементов сектора позволяет повысить адекватность моделирования и обеспечить достоверное распределение напряжений в области лопатки, включая зоны сопряжения с диском и замком.

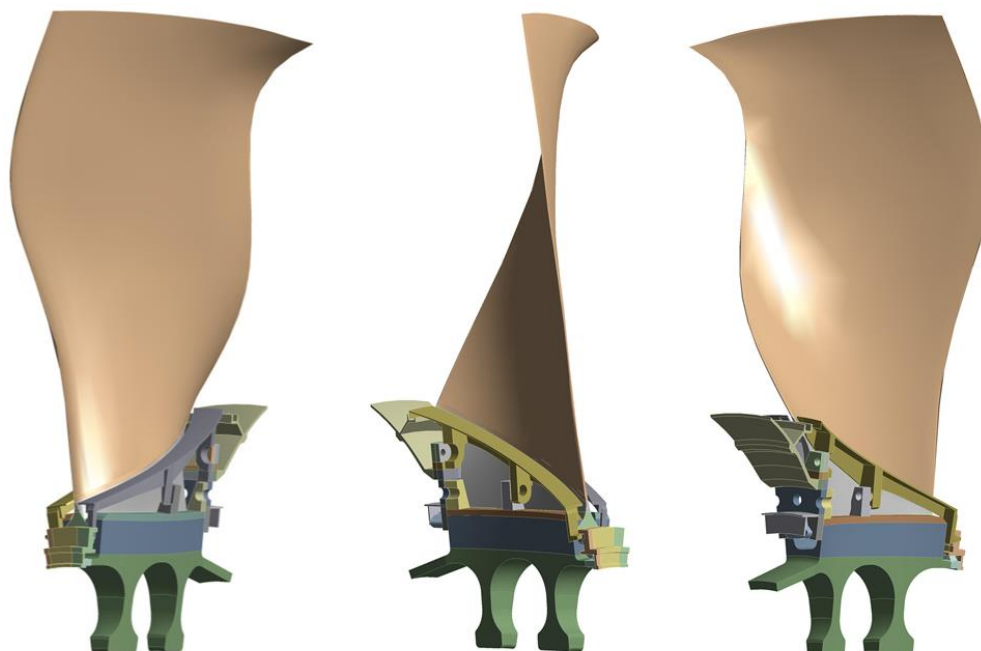


Рисунок 4.1 – Параметрическая модель рабочей лопатки вентилятора «холодной» формы для прочностных расчетов

В рамках расчетного исследования используются три различных материала: первый для барабана бустера, диска вентилятора и фиксирующего кольца; второй для платформы; третий непосредственно для рабочей лопатки вентилятора. Физико-механические характеристики применяемых материалов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сведения об используемых материалах

Параметр	Значение
<b>Барабан бустера, диск вентилятора, Фиксирующее кольцо</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4450
Модуль Юнга, МПа	$1,2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3
Коэффициент теплового расширения, С <sup>-1</sup>	$8,74 \cdot 10^{-6}$
<b>Платформа</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3648
Модуль Юнга, МПа	$6,9 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона	0,3
<b>Лопатка вентилятора</b>	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4513
Модуль Юнга, МПа	$1,077 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3
Коэффициент теплового расширения, С <sup>-1</sup>	$8,74 \cdot 10^{-6}$

При исследовании серии параметрических моделей лопаток «холодной» формы варьированию подвергается исключительно перо лопатки. Такой подход обоснован результатами предшествующих расчетных исследований, которые продемонстрировали пренебрежимо малое влияние геометрических отклонений в области нижней части пера («ножки») на напряженно-деформированное состояние всей лопатки.

С целью минимизации влияния вариаций на оставшуюся часть конструкции и обеспечения сопоставимости результатов расчетная схема построена таким образом, что изменения в конечно-элементной сетке и граничных условиях затрагивают только область пера. На рисунке 4.2 показана лопатка, в которой зеленым цветом выделена изменяемая зона, тогда как серым обозначены участки, сохраняющие неизменную геометрию во всех расчетных случаях.

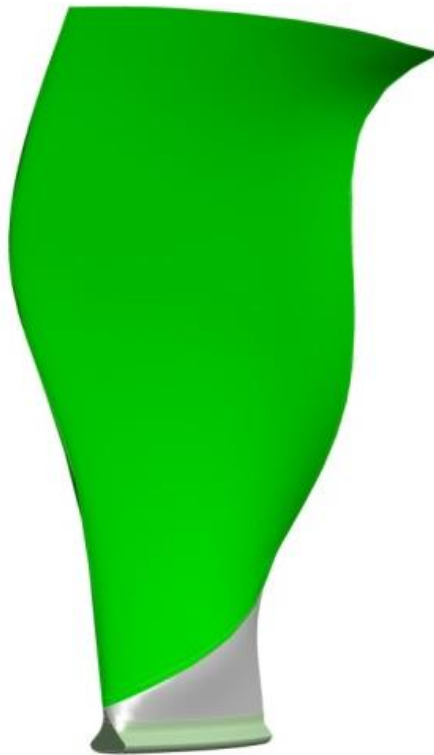


Рисунок 4.2 – Изменяемые и не изменяемые части лопатки при расчетах «холодных» моделей

Для реализации подхода, при котором модификации ограничиваются только пером лопатки, а остальные элементы конструкции остаются неизменными, принята сборочная стратегия моделирования. Расчетная модель формируется как совокупность отдельных сеточных компонентов: изменяемого пера лопатки и неизменяемых – полки, диска, участка барабана, нижней части пера («ножки») и фиксирующего устройства. Каждый компонент дискретизируется собственной конечно-элементной сеткой, которой присваиваются соответствующие свойства, после чего компоненты объединяются в единую расчетную сборку. Общий вид проекта прочностного анализа «холодных» лопаток представлен на рисунке 4.3.

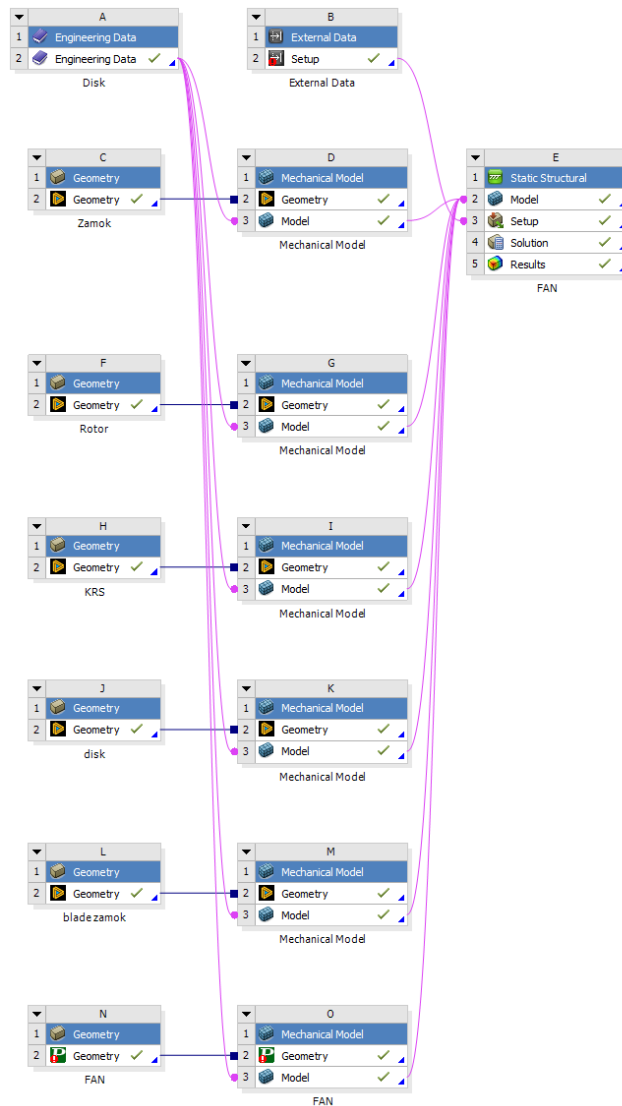


Рисунок 4.3 – Общий вид проекта расчетного исследования «холодных» лопаток на прочность

При проведении серии расчетов модифицированных вариантов обновлению подлежит исключительно сетка пера лопатки, в то время как сетки остальных компонентов и контактные пары между ними сохраняются без изменений. Такой подход позволяет значительно сократить временные затраты на подготовку моделей и повышает эффективность вычислительного процесса.

Как следует из рисунка 4.3, в проекте реализовано шесть импортированных геометрических моделей (обозначения C, E, H, J, L, N) и шесть соответствующих им конечно-элементных сеток (D, F, I, K, M, O). Сборка всех компонентов, задание граничных условий и определение контактных пар с учетом коэффициентов трения выполняются в расчетном модуле G. При этом модули N и O отвечают за импорт геометрии пера лопатки и последующую генерацию ее сетки, что обеспечивает гибкость и автоматизацию процесса при вариативности формы пера.

#### 4.1.2 Описание конечно-элементной сетки расчетной модели

В рамках представленного расчетного проекта конечно-элементная сетка для каждого компонента модели генерируется в отдельном модуле. Последующая сборка всех сеточных компонентов в единую расчетную модель осуществляется в итоговом модуле с использованием контактных взаимодействий. Такой подход обеспечивает высокую гибкость моделирования, позволяя модифицировать отдельные геометрические и сеточные компоненты без необходимости внесения изменений в остальные части расчетной схемы.

Рабочая лопатка в данной расчетной модели представлена в виде двух отдельных тел – изменяемой части (перо лопатки) и неизменяемой (нижняя часть пера и хвостовик), что соответствует схеме, показанной на рисунке 4.2. Данное разделение позволяет осуществлять перестроение сетки исключительно в области пера при варьировании его геометрии, не затрагивая при этом граничные условия, геометрию и конечно-элементную дискретизацию остальных элементов конструкции. Это существенно повышает эффективность проведения серийных расчетов и обеспечивает сопоставимость результатов.

Общий вид конечно-элементной модели рабочей лопатки вентилятора в «холодной» конфигурации, используемой для прочностного анализа, представлен на рисунке 4.4.

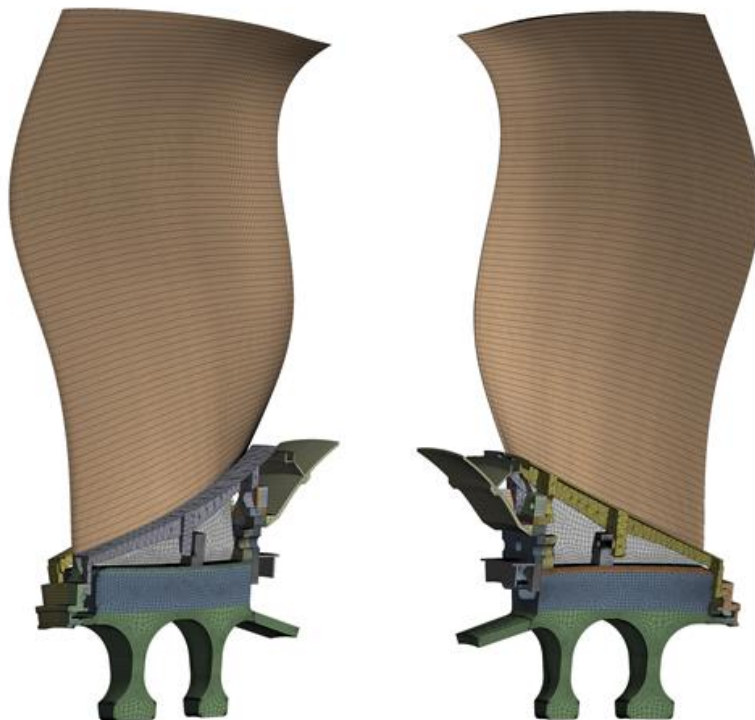



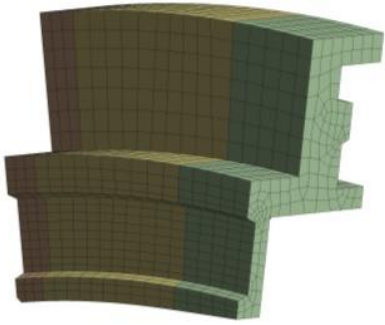

Рисунок 4.4 – Общий вид конечно-элементной сетки рабочей лопатки вентилятора для прочностных расчетов

При построении сетки учитывалась функциональная значимость элементов конструкции. Компоненты, выполняющие в основном массо-инерционную и формообразующую функцию (замок, полка, участок ротора), дискретизированы относительно грубой сеткой. В то же время элементы, напряженно-деформированное состояние которых непосредственно учитывается в

оценке прочности и надежности конструкции – перо лопатки, замковое соединение и диск, моделируются с использованием более детализированной, мелкой сетки, обеспечивающей достаточную точность расчета локальных напряжений.

Параметры конечно-элементных сеток для различных компонентов модели приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры сеточных моделей

Элемент конструкции	Параметр	Значение	Изображение
Диск	Число элементов	237898	
	Число узлов	524115	
	Tet10 элементы	171637	
	Hex20 элементы	48517	
	Wed15 элементы	1849	
	Руг13 элементы	15895	
Замок	Число элементов	2428	
	Число узлов	12783	
	Hex20 элементы	2482	
	Wed15 элементы	52	
Полка	Число элементов	7255	
	Число узлов	3360	
	Tet10 элементы	3360	

Продолжение таблицы 4.2

Элемент конструкции	Параметр	Значение	Изображение
Часть ротора	Число элементов	16815	
	Число узлов	59120	
	Tet10 элементы	8481	
	Hex20 элементы	7627	
	Wed15 элементы	304	
	Руг13 элементы	403	
Замок лопатки	Число элементов	65951	
	Число узлов	217901	
	Tet10 элементы	11580	
	Hex20 элементы	34042	
	Wed15 элементы	1895	
	Руг13 элементы	18434	
Перо лопатки (изменяемая часть)	Число элементов	15000...25000	
	Число узлов	100000...110000	
	Hex20 элементы	15000...25000	
	Wed15 элементы	100...200	

Поскольку расчетная модель представляет собой сборку из нескольких деталей, их взаимодействие в рамках единой системы моделируется с помощью контактных пар. В расчете используются как линейные, так и нелинейные типы контактов в зависимости от характера сопряжения. Коэффициент трения на всех контактных поверхностях принят равным 0,25, что соответствует типичным значениям для металлических соединений при условиях эксплуатации вентилятора.

Обобщенная схема контактного взаимодействия между элементами конечно-элементной сборки приведена на рисунке 4.5.

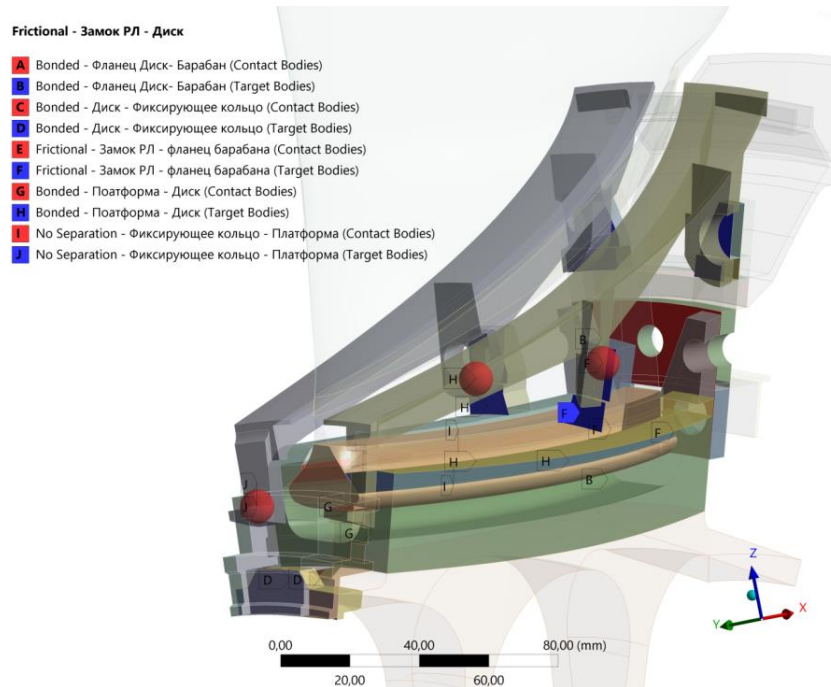


Рисунок 4.5 – Контактные условия, используемые в модели

Изначально контактные поверхности и типы взаимодействий задаются вручную на этапе настройки базовой модели. Благодаря параметризации и сохранению неизменной топологии контактных пар, при модификации геометрии пера лопатки повторное определение контактных условий не требуется, что дополнительно снижает трудоемкость расчетного процесса и минимизирует риск ошибок при настройке.

#### 4.1.3 Описание граничных условий расчетной модели

Граничные условия, применяемые в рамках расчетного исследования «холодных» моделей рабочих лопаток вентилятора, систематизированы и представлены в таблице 4.3. Помимо указанных условий, в модель включены начальные перемещения элементов бустера и диска, а также активирована опция учета больших перемещений и поворотов, что позволяет адекватно моделировать геометрически нелинейное поведение конструкции. Расчетная задача решается в нелинейной постановке в два последовательных шага.

Таблица 4.3 – Граничные условия расчетной модели

Тип граничного условия	Значение	Шаг 1	Шаг 2
Запрет перемещений в окружном направлении	0	+	+
Давление на корыто лопатки	Поле давлений из газодинамического расчета	-	+
Давление на спинку лопатки	Поле давлений из газодинамического расчета	-	+
Частота вращения	659 рад/сек	+	+
Поправочная сила	10 Н	+	-
Начальное перемещение	0,2 мм	+	-

На первом шаге для обеспечения устойчивой итерационной сходимости и корректного установления контактного взаимодействия между лопаткой и диском вводятся вспомогательные нагрузки поправочная сила (10 Н) и начальное осевое перемещение (0,2 мм). Эти искусственные воздействия способствуют плавному входу в контакт и предотвращают возможные трудности, связанные с разрывом контакта или плохой сходимостью на начальной стадии расчета. На втором шаге данные вспомогательные воздействия отключаются, а контактное состояние полностью определяется естественными нагрузками центробежными силами, обусловленными частотой вращения (659 рад/с), и аэродинамическим давлением, приложенным к корыту и спинке пера лопатки на основе данных газодинамического расчета.

Использование модульной сборочной схемы конечно-элементной модели позволяет в рамках оптимизационного цикла изменять исключительно геометрию и сетку пера лопатки, оставляя неизменными все остальные компоненты конструкции, включая диск, полку, замок и участок ротора. Благодаря параметризации и сохранению неизменной топологии контактных пар и граничных условий, их настройка выполняется однократно при инициализации первой расчетной модели. Для всех последующих вариантов, отличающихся лишь геометрией пера, повторное определение контактных взаимодействий и граничных условий не требуется, что значительно повышает вычислительную эффективность и снижает вероятность ошибок при подготовке расчетных случаев.

#### 4.1.4 Результаты прочностных статических расчетов

В рамках прочностного анализа «холодных» моделей рабочих лопаток вентилятора проводится всесторонняя оценка напряженно-деформированного состояния, включающая следующие ключевые характеристики:

- радиальные перемещения пера лопатки,  $\delta_x$ ;
- окружные перемещения пера лопатки,  $\delta_y$ ;
- осевые перемещения пера лопатки,  $\delta_z$ ;
- суммарные перемещения пера лопатки,  $\delta_\Sigma$ ;
- напряжения в пере лопатки,  $\sigma_{\text{перо}}$ ;

– напряжения в скруглениях лопатки,  $\sigma_{\text{скруг}}$ .

Варьируемые геометрические характеристики исследуемых параметрических моделей лопаток вентилятора представлены в таблице 3.1 раздела 3.1.2.

Полученные численные значения указанных параметров обобщены и представлены в таблице 4.4. Максимальные значения в таблице выделены красным цветом, минимальные (в сравнении с номинальной моделью) – синим, что позволяет визуально оценить степень влияния геометрических отклонений на деформационные и прочностные показатели.

Таблица 4.4 – Результаты прочностных расчетов комплекта «холодных» моделей рабочей лопатки вентилятора

Имя модели	Максимальные перемещения (по модулю), (мм)				Напряжения в пере лопатки, $\sigma_{\text{перо}}$ (МПа)	Напряжения в скруглениях лопатки, $\sigma_{\text{скруг}}$ , (МПа)
	Радиальные, $\delta_x$	Окружные, $\delta_y$	Осевые, $\delta_z$	Суммарные, $\delta_{\Sigma}$		
0_C (номинал)	1,57	4,99	6,52	8,35	353	485
1 C min	1,58	5,07	6,63	8,49	351	485
2 C min	1,59	4,90	6,46	8,25	352	484
3 C min	1,46	4,46	5,86	7,49	349	485
4 C min	1,58	5,11	6,69	8,54	345	486
5 C min	1,58	4,87	6,48	8,24	355	486
6 C min	1,52	4,51	6,04	7,64	348	486
7 C min	1,57	4,97	6,46	8,34	347	486
8 C min	1,58	5,16	6,67	8,55	343	487
9 C min	1,59	4,85	6,45	8,40	349	486
10 C min	1,58	4,96	6,49	8,41	350	483
11 C min	1,57	4,96	6,50	8,39	346	483
12 C min	1,59	5,21	6,46	8,16	353	484
13 C min	1,57	4,92	6,52	8,40	345	486
14 C min	1,57	4,93	6,52	8,40	345	485
15 C min	1,56	4,87	6,59	8,49	356	485
16 C min	1,58	5,25	6,56	8,46	355	479
17 C min	1,59	5,29	6,52	8,58	355	480
18 C min	1,59	5,29	6,60	8,62	356	483
1 C max	1,56	4,91	6,41	8,21	355	485
2 C max	1,55	5,08	6,58	8,45	354	486
3 C max	1,68	5,52	7,18	9,21	359	485
4 C max	1,56	4,89	6,35	8,16	363	484
5 C max	1,56	5,11	6,56	8,46	351	484
6 C max	1,64	5,49	7,02	9,06	358	484
7 C max	1,57	4,93	6,58	8,36	359	484
8 C max	1,56	4,84	6,37	8,15	365	483
9 C max	1,55	5,15	6,59	8,50	357	484
10 C max	1,56	4,94	6,49	8,29	356	489
11 C max	1,57	4,94	6,50	8,31	360	489
12 C max	1,55	4,79	6,46	8,18	353	488
13 C max	1,57	5,08	6,52	8,4	361	484
14 C max	1,57	5,07	6,52	8,40	361	485
15 C max	1,58	5,13	6,59	8,49	350	485
16 C max	1,56	4,75	6,56	8,24	351	491
17 C max	1,55	4,71	6,52	8,18	351	490
18 C max	1,55	4,71	6,44	8,12	350	487

Примечание: индекс «С» в обозначении модели указывает на «холодное» состояние геометрии.

В качестве примера на рисунках 4.6-4.9 представлены результаты прочностных расчетов «холодной» модели лопатки варианта «5\_C\_max». Подробные геометрические характеристики данной лопатки приведены в таблице 3.1 (раздел 3.1.2). Данные визуализации отражают распределение перемещений и напряжений, позволяя оценить локализацию зон концентрации напряжений и характер деформирования лопатки при предельных отклонениях формы.

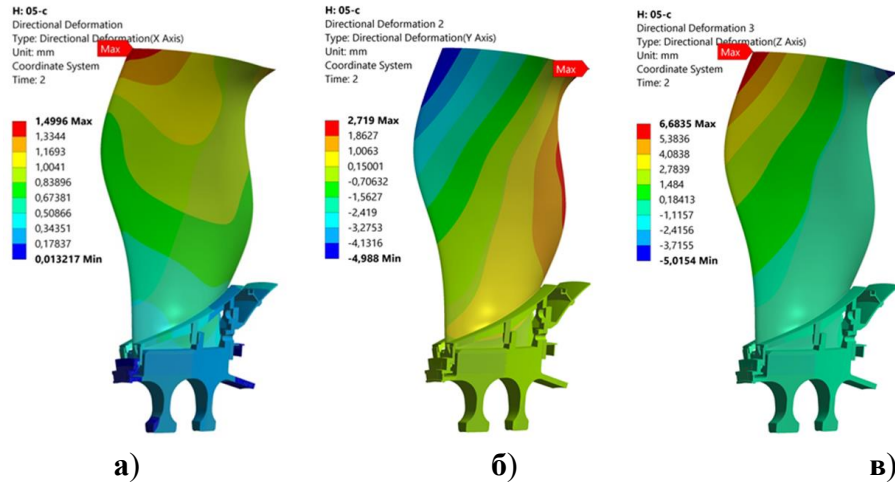


Рисунок 4.6 – Перемещения пера лопатки, мм  
(а – радиальные; б – окружные; в – осевые)

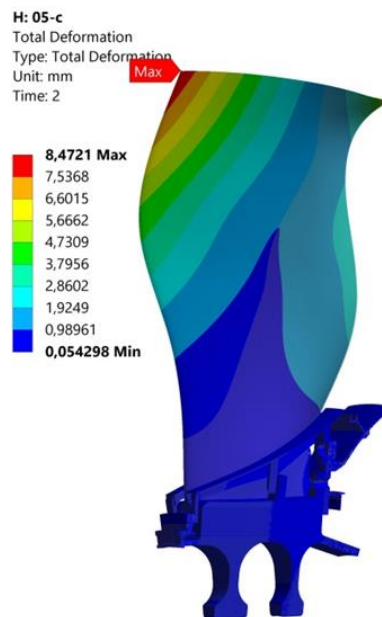


Рисунок 4.7 – Суммарные деформации, мм

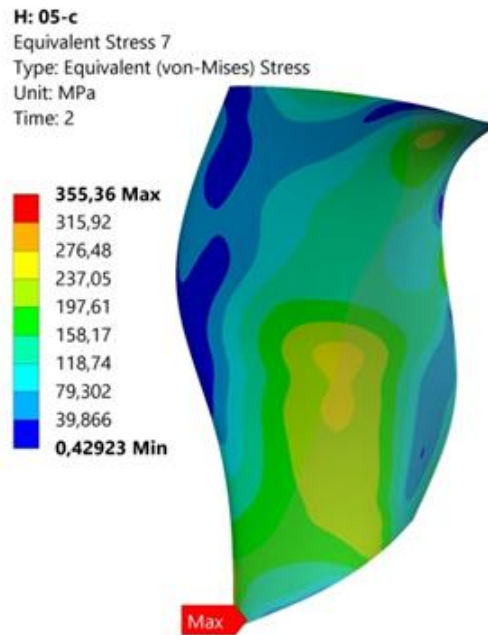


Рисунок 4.8 – Максимальные напряжения в перо лопатки, МПа

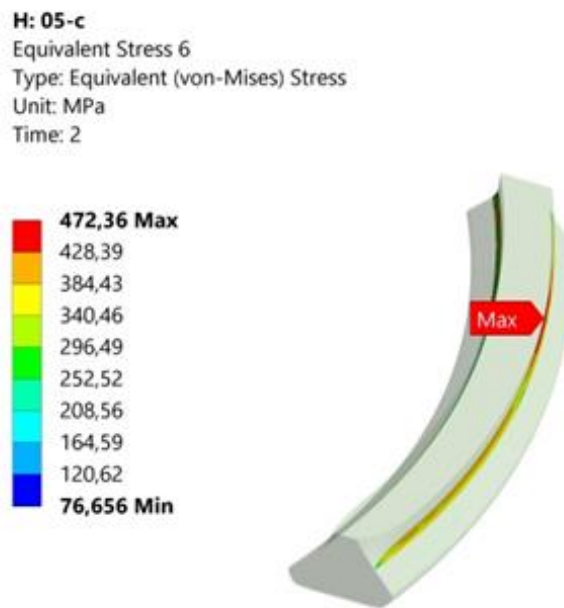


Рисунок 4.9 – Максимальные напряжения в области скруглений лопатки, МПа

Следует отметить, что на основе полученных деформированных моделей лопаток, сформированных с учетом статического напряженно-деформированного состояния в условиях эксплуатационных нагрузок, в дальнейшем выполняется построение их «горячей» геометрии. Данная геометрия используется в последующих газодинамических расчетах для оценки аэродинамических характеристик вентиляторной ступени с учетом реального поведения конструкции в рабочем режиме.

## **4.2 Анализ чувствительности прочностных показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям**

### **4.2.1 Постановка задачи анализа чувствительности прочностных показателей**

Постановка задачи анализа чувствительности заключается в количественной оценке влияния варьируемых геометрических параметров (см. Таблица 3.1 раздела 3.1.2) на критерии эффективности и ограничиваемые показатели работоспособности конструкции. Математически данная задача сводится к определению частных производных функций «отклика» по каждому из входных параметров, характеризующих отклонения формы лопатки, для заданных режимов нагружения. Базовые численные значения прочностных показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора, принятые за точку отсчета при анализе чувствительности, приведены в таблице 4.4 раздела 4.1.4.

Проведение анализа чувствительности является важным этапом исследования, позволяющим установить зависимости между геометрическими переменными и результирующими прочностными характеристиками такими как напряжения и перемещения. Полученные зависимости обеспечивают понимание степени влияния отдельных параметров на напряженно-деформированное состояние и позволяют выявить наиболее критичные зоны конструкции по отношению к производственным допускам.

Расчеты выполняются на основе параметризованной модели сектора рабочего колеса, содержащего одну лопатку и сопряженные элементы (диск, замок, полка), в рамках традиционной конечно-элементной постановки. При определении чувствительности каждый варьируемый параметр последовательно устанавливается на «правую» и/или «левую» границу допуска, что позволяет оценить характер и степень изменения отклика системы при экстремальных отклонениях геометрии.

Одним из ключевых результатов анализа является возможность установления линейной или слабо нелинейной зависимости между геометрическими параметрами лопатки в «холодном» состоянии и результирующими прочностными показателями. Это создает предпосылки для построения линеаризованной модели, пригодной для оперативной оценки влияния производственных погрешностей на эксплуатационные характеристики вентилятора без необходимости проведения полномасштабных расчетов на каждом шаге.

Такой подход способствует повышению эффективности процесса проектирования и оптимизации, а также обеспечивает основу для вероятностного анализа надежности лопаточной машины в условиях реального производства.

#### **4.2.2 Варьируемые геометрические переменные анализа чувствительности прочностных показателей**

Варьируемые геометрические переменные, рассматриваемые в рамках задачи анализа чувствительности, определены на основе оценки вероятностных характеристик геометрии профиля рабочей лопатки вентилятора, выполненного по результатам статистической обработки данных измерений геометрических параметров исследуемой партии лопаток (см. Таблица 3.1 раздела 3.1.2). Такой подход позволяет выделить наиболее значимые параметры, подверженные производственным отклонениям, и учесть их влияние на эксплуатационные характеристики конструкции.

Поскольку исследование направлено на модернизацию существующей вентиляторной ступени, в качестве варьируемых параметров рассматриваются отклонения геометрических характеристик от номинальных значений, соответствующие предельным («правым» и «левым») границам установленных технологических допусков. Данный выбор обусловлен необходимостью оценки работоспособности конструкции в наиболее напряженных условиях, характерных для крайних случаев производственной дисперсии.

Следует отметить, что состав варьируемых переменных является задаче-ориентированным и может корректироваться в зависимости от целей исследования, уровня производственной стабильности и степени влияния параметров на аэродинамические и прочностные характеристики.

#### **4.2.3 Результаты анализа чувствительности прочностных показателей**

В настоящем разделе представлены результаты анализа чувствительности деформационных и прочностных характеристик рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям, обусловленным технологической дисперсией, возникающей на этапах производства. Анализ выполнен на основе параметрических конечно-элементных моделей лопаток «холодной» геометрии, что позволяет систематически оценивать влияние отдельных варьируемых параметров таких как угол установки, толщина профиля и положение центра тяжести на напряженно-деформированное состояние конструкции при действии эксплуатационных нагрузок, включая центробежные и температурные воздействия.

В таблице 4.5 приведены коэффициенты чувствительности геометрических параметров к основным прочностным характеристикам рабочей лопатки вентилятора.

Коэффициенты определены как относительные отклонения исследуемых показателей от их номинальных значений, соответствующих базовой геометрии. Все значения приведены в процентах, что обеспечивает сопоставимость влияния различных параметров на выходные характеристики системы. Максимальные отклонения выделены красным цветом, минимальные

– синим, что позволяет визуально оценить степень влияния каждого геометрического фактора и выявить наиболее критичные параметры с точки зрения прочности и жесткости конструкции.

Таблица 4.5 – Коэффициенты влияния варьируемых геометрических переменных на прочностные характеристики (в % от номинала)

Имя модели	Максимальные перемещения (по модулю)				Напряжения в пере лопатки, $\sigma_{\text{перо}}$	Напряжения в скруглениях лопатки, $\sigma_{\text{скруг}}$
	Радиальные, $\delta_x$	Окружные, $\delta_y$	Осевые, $\delta_z$	Суммарные, $\delta_{\Sigma}$		
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

*Примечание: индекс «С» в обозначении модели указывает на «холодное» состояние геометрии.*

На основании проведенного анализа чувствительности деформационных и прочностных характеристик рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям, установлены следующие закономерности:

1. Наиболее значимое влияние на изменение перемещений пера лопатки оказывает смещение центра тяжести, характеризуемое параметрами  $T_x-1,0$  и  $T_x+1,0$  в 90-м сечении по высоте лопатки (модели 3\_C\_min и 3\_C\_max). Для указанных моделей лопаток зафиксированы

экстремальные значения отклонений по всем компонентам перемещений – радиальным, окружным и осевым, а также по суммарному вектору деформации. В частности, коэффициент влияния на окружные перемещения достигает 10,62%. При смещении  $T_x-1,0$  наблюдается снижение  $\delta_y$  с номинальных 4,99 мм до 4,46 мм, а при  $T_x+1,0$  – увеличение до 5,52 мм. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности жесткости лопатки к геометрическим отклонениям, влияющим на положение центра масс сечения.

2. Варьирование толщины профиля у выходной кромки  $e2-0,3$  и  $e2+0,3$  в 90-м сечении (модели 18\_C\_min и 18\_C\_max) оказывает значимое влияние на жесткость рабочей лопатки вентилятора. При этом увеличение толщины профиля приводит к снижению перемещений по всем направлениям, что свидетельствует о повышении изгибной жесткости пера, тогда как уменьшение толщины сопровождается их ростом. Максимальное снижение окружных перемещений составляет 5,61% ( $\delta_y=4,71$  мм по отношению к номинальному значению 4,99 мм), а максимальное увеличение – 6,01% ( $\delta_y=5,29$  мм).

Аналогичная закономерность наблюдается для моделей 17\_C\_min и 17\_C\_max, соответствующих вариации параметра  $e2$  в 75-м сечении. Это подтверждает высокую чувствительность жесткости лопатки к изменению толщины в хвостовой части профиля по всей высоте, а также обосновывает важность точного контроля данного геометрического параметра на этапах изготовления и контроля качества. Полученные данные свидетельствуют о том, что локальное увеличение толщины в районе выходной кромки может быть эффективным средством повышения жесткости и снижения статических нагрузок в рабочих лопатках.

3. Максимальное увеличение напряжений в пере рабочей лопатки зафиксировано для модели 8\_C\_max, соответствующей увеличению угла установки на  $\Theta+0,55^\circ$  в 75-м сечении по высоте лопатки. Уровень напряжений возрос на 3,35% с 353 МПа до 365 МПа. В то же время максимальное снижение напряжений зафиксировано для модели 8\_C\_min при уменьшении угла установки на  $\Theta-0,55^\circ$  в том же сечении, где напряжения снизились на 2,27% до 345 МПа.

4. Изменение напряженного состояния в зонах концентрации в области скруглений профиля оказалось сравнительно умеренным. Максимальное увеличение напряжений составило 1,15% и зафиксировано для модели 16\_C\_max, соответствующей увеличению толщины профиля у выходной кромки  $e2+0,3$  мм в 45-м сечении. В данном случае уровень напряжений возрос с 485 МПа до 491 МПа. При этом максимальное снижение напряжений достигло -1,24% для модели 16\_C\_min ( $e2-0,3$  мм в том же сечении), где напряжения уменьшились до 479 МПа.

Полученные данные свидетельствуют о слабой чувствительности напряженного состояния в критических зонах концентрации к вариациям геометрии выходной кромки. Это указывает на относительную устойчивость распределения напряжений в скруглениях профиля в условиях рассматриваемых производственных отклонений и позволяет предположить наличие

достаточного запаса прочности в данных областях даже при реализации предельных значений допусков.

Результаты проведенного анализа позволяют идентифицировать геометрические параметры, оказывающие наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние рабочей лопатки вентилятора, и на этой основе сформировать репрезентативный набор моделей для последующей верификации симметрии коэффициентов чувствительности.

#### **4.2.4 Проверка зависимости между варьируемыми геометрическими переменными и напряженно-деформированным состоянием**

С целью установления зависимости между геометрией лопатки и ее прочностными характеристиками, а также для создания модели экспресс-оценки производственных отклонений, были построены графики чувствительности ключевых показателей НДС (см. Приложение В). Данные графики базируются на результатах, приведенных в таблице 4.5 (раздел 4.2.4).

На построенных зависимостях по оси ординат отложены коэффициенты влияния, рассчитанные как относительные отклонения напряжений и перемещений от номинальных значений. По оси абсцисс представлены значения варьируемых геометрических параметров, изменяющихся в пределах поля допуска от нижней («левой») до верхней («правой») границы.

Наиболее значимые графические зависимости представлены на рисунках 4.10 и 4.11. Так, например, наибольшее влияние на перемещения пера лопатки оказывает смещение центра тяжести (модели 3\_С): отклонения достигают экстремальных значений, а чувствительность окружных перемещений составляет до 10,62% ( $\delta y$  – варьируется от 4,46 до 5,52 мм). Варьирование толщины выходной кромки (модели 18\_С) также существенно меняет жесткость: утолщение профиля снижает перемещения на 5,61%, а истончение – увеличивает их на 6,01%. Результаты подтверждают высокую зависимость жесткости лопатки от геометрических отклонений массы и сечения.

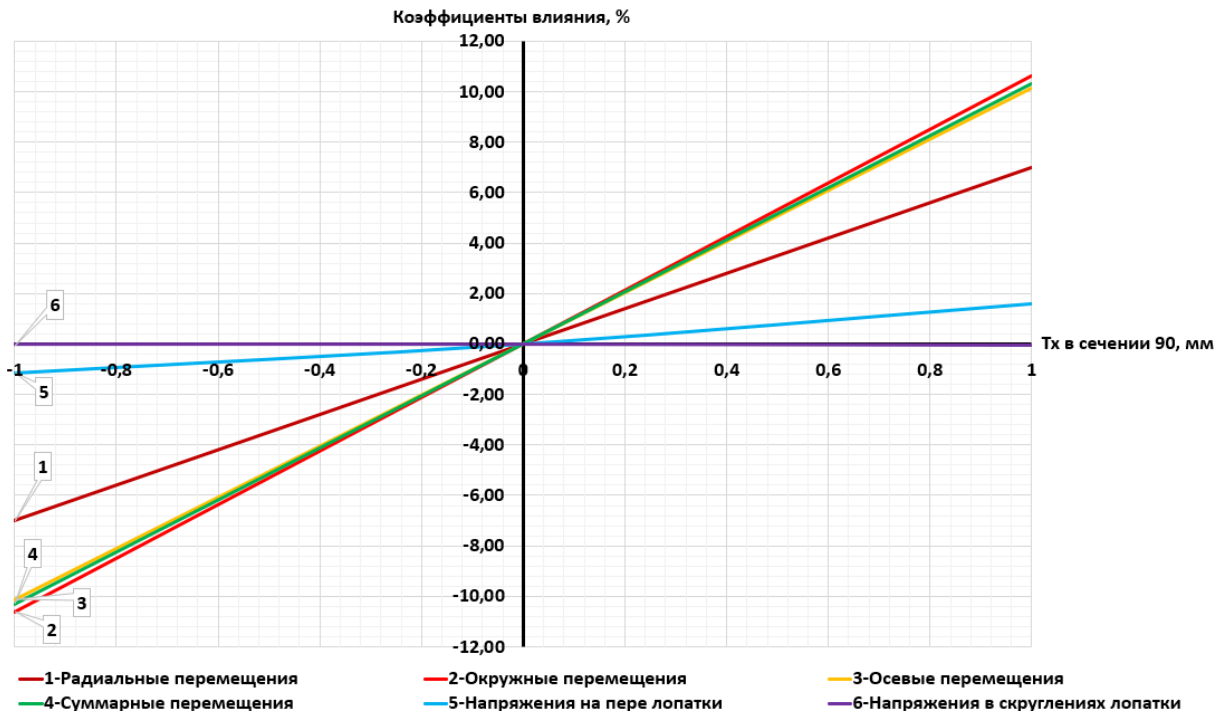


Рисунок 4.10 – График зависимости для моделей 3\_C\_min и 3\_C\_max

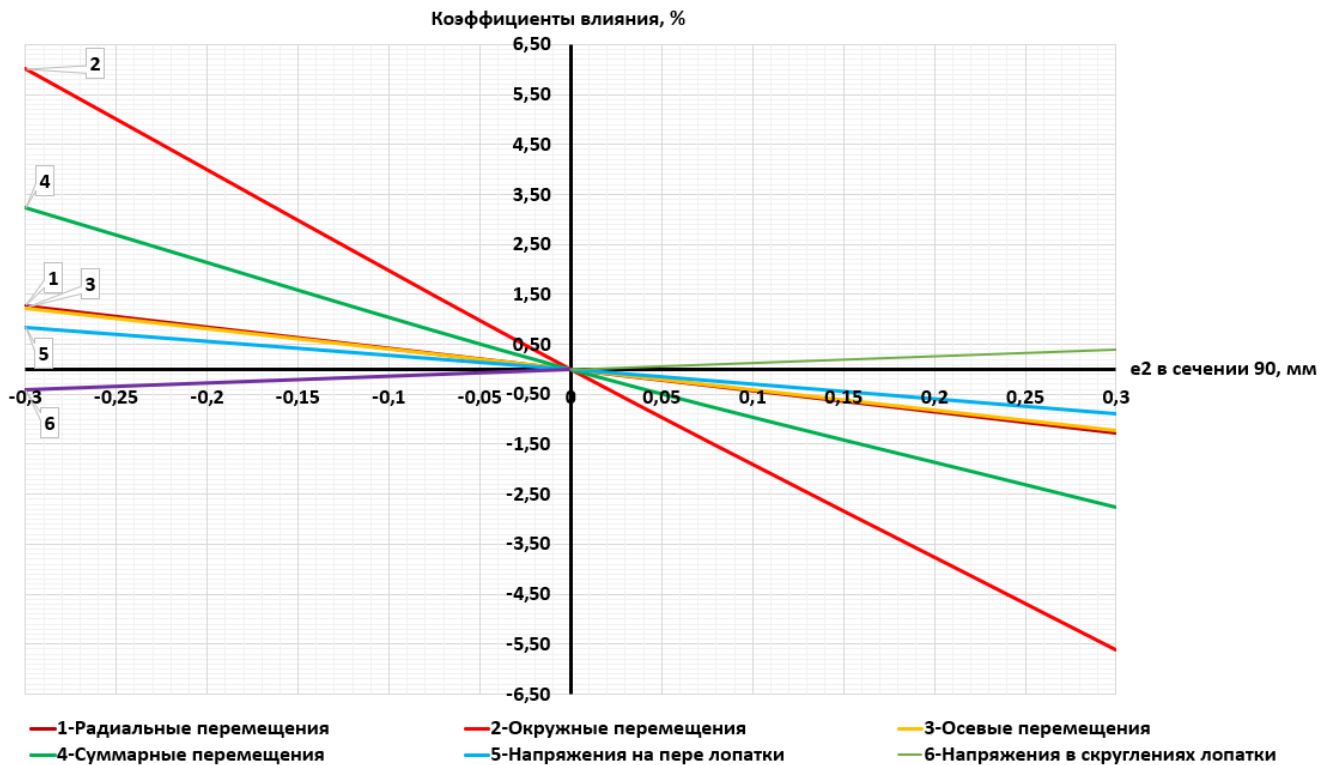


Рисунок 4.11 – График зависимости для моделей 18\_C\_min и 18\_C\_max

В ходе анализа зависимостей между варьируемыми геометрическими переменными рабочей лопатки вентилятора и ее прочностными характеристиками установлено, что линейная аппроксимация отклика системы применима не для всех рассматриваемых параметров. В частности, параметры, такие как угол установки ( $\Theta$ ) (модели: 7\_C, 8\_C, 9\_C), максимальная толщина профиля ( $E$ ) (модели: 10\_C, 11\_C, 12\_C) и толщина профиля вблизи входной кромки

(e1) (модели: 13\_C, 14\_C, 15\_C) демонстрируют существенно нелинейное поведение по отношению к ряду прочностных показателей – напряжениям и перемещениям (см. Рисунок 4.12). Нелинейность обусловлена сложным характером перераспределения нагрузок, включая взаимодействие аэродинамических, инерционных и упругих составляющих, что делает построение линейной аппроксимированной модели для этих параметров недостаточно точным и, как следствие, неприемлемым для использования в целях экспресс-оценки влияния производственных отклонений.

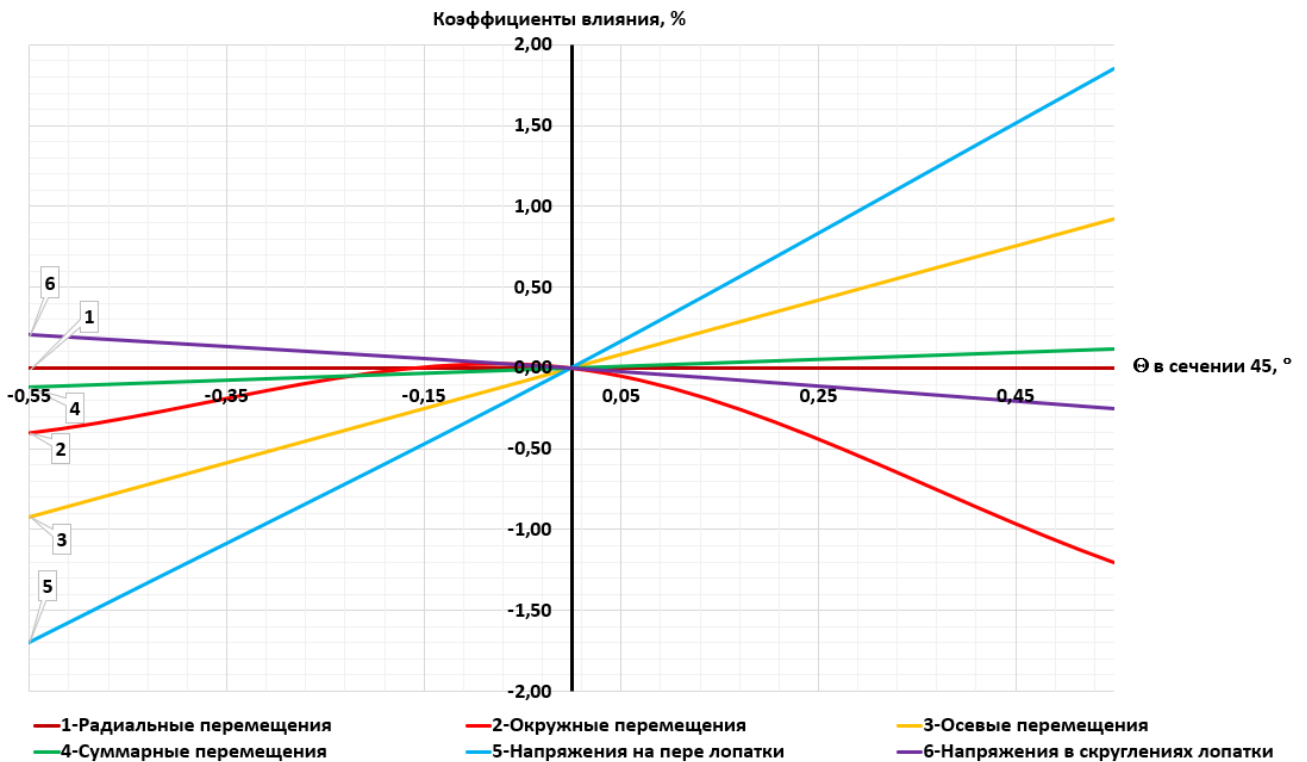


Рисунок 4.12 – График зависимости для моделей 7\_C\_min и 7\_C\_max

В то же время для ряда других варьируемых параметров – смещения центра тяжести в радиальном ( $T_x$ ) (модели: 1\_C, 2\_C, 3\_C) и окружном ( $T_y$ ) (модели: 4\_C, 5\_C, 6\_C) направлениях, а также толщины профиля у выходной кромки (e2) (модели: 16\_C, 17\_C, 18\_C) выявлена удовлетворительная степень линейности отклика по основным прочностным характеристикам. Для указанных переменных возможно построение линеаризованных моделей чувствительности, пригодных для оперативного анализа и прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния в условиях технологической дисперсии.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Создана параметризованная конечно-элементная модель сектора рабочего колеса вентилятора, включающая лопатку, диск, замок и элементы фиксации. Реализована модульная сборочная стратегия моделирования в среде ANSYS Workbench, позволяющая варьировать

геометрию пера лопатки без изменения сеток и граничных условий сопряженных элементов (диска, замка, полки). Применение условий циклической симметрии и нелинейных контактных взаимодействий обеспечило адекватное воспроизведение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при центробежных и аэродинамических нагрузках. Данный подход позволил существенно сократить трудоемкость подготовки расчетных случаев для серии из 37 модифицированных моделей.

Проведен статический прочностной расчет рабочих лопаток в «холодном» состоянии с учетом предельных производственных отклонений ключевых геометрических параметров (толщины профиля, угла установки, положения центра тяжести). Установлено, что вариации геометрии в пределах технологических допусков приводят к изменению максимальных суммарных перемещений пера лопатки в диапазоне до  $\pm 10,3\%$ , а эквивалентных напряжений в теле пера до  $\pm 3,35\%$ . Напряжения в зонах концентрации (скруглениях профиля) демонстрируют наименьшую чувствительность к геометрическим возмущениям (отклонения в пределах  $\pm 1,24\%$ ), что свидетельствует о сохранении запаса прочности в критических зонах даже при реализации крайних значений допусков.

На основе анализа чувствительности идентифицированы параметры, оказывающие наибольшее влияние на жесткость и прочность лопатки:

- перемещения: наибольшую чувствительность демонстрируют окружные и радиальные перемещения по отношению к смещению центра тяжести сечения ( $T_x, T_y$ ) в периферийной зоне (до  $\pm 10,6\%$ ) и к изменению толщины профиля у выходной кромки ( $e_2$ ) (до  $\pm 6\%$ ). Это указывает на высокую зависимость изгибной жесткости лопатки от распределения массы и геометрии хвостовой части профиля;

- напряжения: Максимальное влияние на уровень напряжений в пере лопатки оказывает варьирование угла установки профиля ( $\Theta$ ) в средних сечениях (изменение до  $\pm 3,35\%$ ), что связано с перераспределением аэродинамической нагрузки и изменением плеча приложения центробежных сил.

Исследован характер связи между варьируемыми геометрическими переменными и прочностными характеристиками. Установлено, что для параметров, связанных со смещением центра тяжести ( $T_x, T_y$ ) и толщиной выходной кромки ( $e_2$ ), зависимость отклика системы (перемещений и напряжений) может быть с достаточной точностью описана линейной моделью. В то же время, варьирование угла установки ( $\Theta$ ), максимальной толщины профиля ( $E$ ) и толщины входной кромки ( $e_1$ ) демонстрирует существенно нелинейное поведение вследствие сложного перераспределения нагрузок. Это требует использования нелинейных аппроксимаций или прямого численного моделирования для данных параметров при прогнозировании прочности.

Полученные деформированные конфигурации лопаток в «холодном» состоянии послужили основой для построения «горячей» геометрии, учитывающей эксплуатационные деформации. Результаты анализа чувствительности прочностных характеристик позволяют сформировать репрезентативный набор моделей для последующего газодинамического расчета и многодисциплинарной оптимизации, обеспечивая учет реального разброса геометрических параметров при оценке надежности и эффективности вентиляторной ступени.

## **ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРНОЙ СТУПЕНИ К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОТКЛОНЕНИЯМ ЛОПАТОК**

Настоящий этап завершает расчетную серию, методология которой разработана и представлена в предыдущих главах диссертации. Его основная задача заключается в оценке влияния производственных отклонений геометрии рабочих лопаток вентилятора на их аэродинамические характеристики. Ввиду необходимости выполнения большого числа однотипных расчетов, обусловленного количеством варьируемых геометрических параметров, для повышения вычислительной эффективности и сокращения трудозатрат на подготовку исходных данных используется метод параметрического моделирования.

В рамках данного подхода формируется параметрическая модель рабочей лопатки в «горячей» геометрии. При этом деформационные поля, необходимые для перехода от «холодной» формы к рабочей, принимаются из результатов статического прочностного анализа, выполненного на предыдущем этапе исследования (см. Глава 4). Ключевые геометрические характеристики такой модели заданы в виде управляемых переменных, что позволяет интегрировать как технологические отклонения, так и термомеханические деформации. Эта модель служит непосредственной основой для построения расчетной области течения. Таким образом, геометрия лопатки определяет конфигурацию проточной части, обеспечивая физически корректное описание взаимодействия потока с реальной поверхностью лопаточного венца. Автоматизированное формирование таких моделей позволяет проводить серийные аэродинамические расчеты с высокой степенью воспроизводимости, внутренней согласованности входных данных и достоверности получаемых результатов.

Расчетное исследование аэродинамических характеристик рабочих лопаток вентилятора выполнено с использованием программного комплекса NUMECA, обеспечивающего интегрированную среду для выполнения конечно-элементного анализа с возможностью параметризации геометрии, автоматизации расчетных процедур и обработки результатов [121].

### **5.1 Аэродинамический расчет компрессора низкого давления**

#### **5.1.1 Описание расчетной модели**

Основой для исследования течений в турбомашине является расчетная область – пространство вокруг обтекаемых тел, заполненное рабочим телом и ограниченное границами межлопаточного канала, а также входным и выходным сечениями.

Объектом численного исследования служит модель, представленная на рисунке 5.1. В качестве расчетной области для каждого венца выбрана периодическая часть, содержащая одну лопатку. Полная аэродинамическая 3D-модель включает:

- вентилятор (24 рабочие лопатки);
- спрямляющий аппарат (76 лопаток);
- силовые стойки (10 шт.);
- трехступенчатый осевой бустер, состоящий из ротора (3 ступени) и статора (4 ступени).

Ротор вентилятора состоит из рабочего колеса с 24 радиально установленными широкохордными лопатками и двух коков (переднего и заднего), закрывающих ступицу. Лопатки предназначены для преобразования механической энергии вращения ротора низкого давления в кинетическую энергию воздушного потока.

Бустер обеспечивает компрессор высокого давления (КВД) необходимым массовым расходом и степенью повышения давления. Привод вентилятора и бустера осуществляется турбиной низкого давления (ТНД).

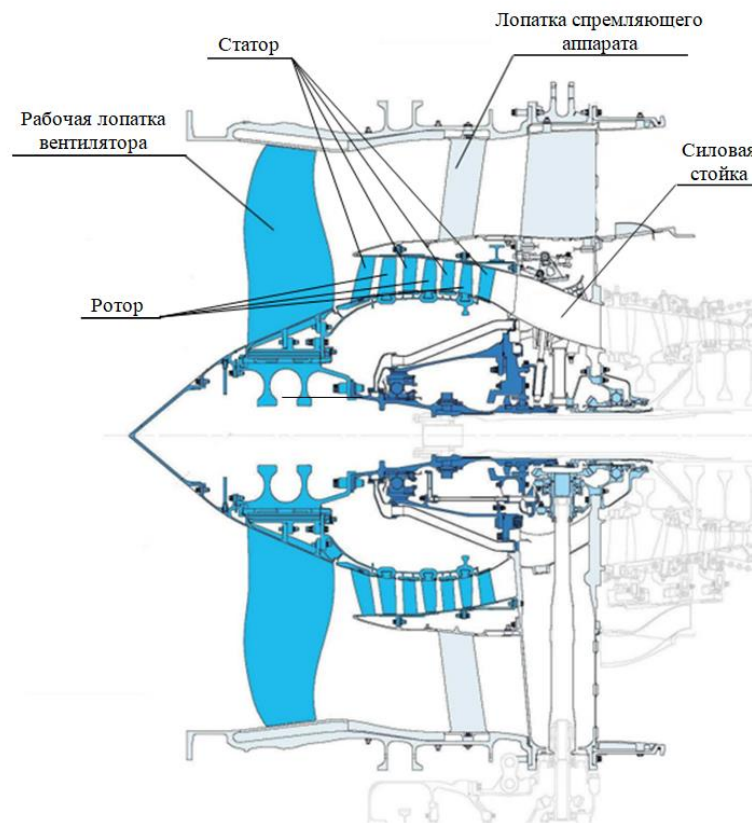


Рисунок 5.1 – Схема расчетной области исследуемого компрессора низкого давления

Для наглядной идентификации основных элементов трехмерной аэродинамической модели компрессора низкого давления использована цветовая дифференциация (см. Рисунок 5.2):

- область входа (inlet) – синим;
- перо рабочей лопатки вентилятора (fan blade) – зеленым;
- входной направляющий аппарат бустера (igv) – фиолетовым;
- перо лопаток ротора (r2, r3, r4) – бирюзовым;
- перо лопаток статора (s2, s3, s4) – желтым;
- перо лопатки спрямляющего аппарата (ogv blade) – розовым;
- силовая стойка (st blade) – оранжевым;
- область выхода из внешнего контура (ogv outlet) – голубым;
- область выхода из внутреннего контура (st outlet) – красным.

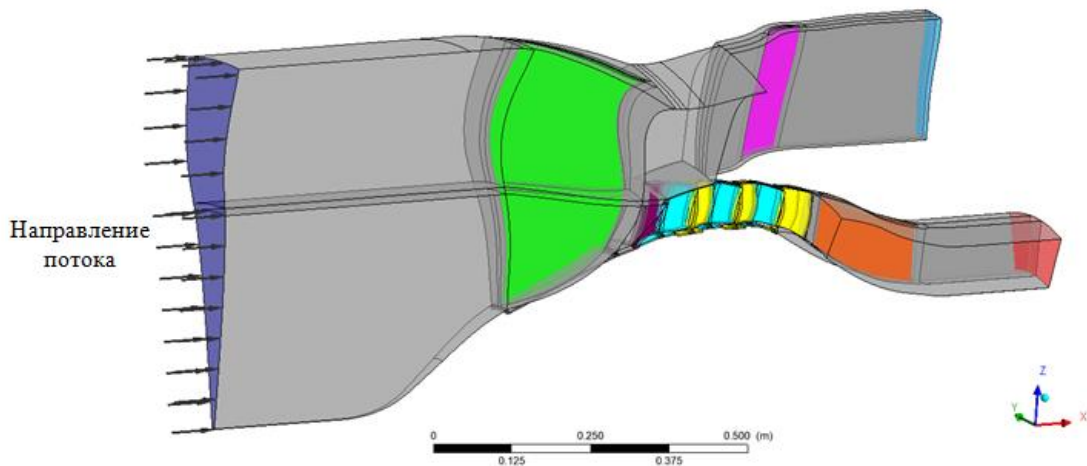


Рисунок 5.2 – Основные элементы расчетной модели

### 5.1.2 Описание конечно-элементной сетки расчетной модели

Для генерации расчетных сеток лопаточных венцов проточной части использовался программный комплекс ANSYS CFX TurboGrid с применением шаблона Generic Multi-Block Grid. Данный подход предполагает формирование многоблочной O-сетки вблизи поверхности лопаток и H-сетки в межлопаточных каналах. Итоговая сетка является блочно-структурированной и состоит из гексаэдрических элементов. Для корректного разрешения пограничного слоя предусмотрено сгущение сетки в пристеночных областях. Общий вид расчетной сетки, используемой для анализа аэродинамических характеристик компрессора низкого давления, представлен на рисунке 5.3.

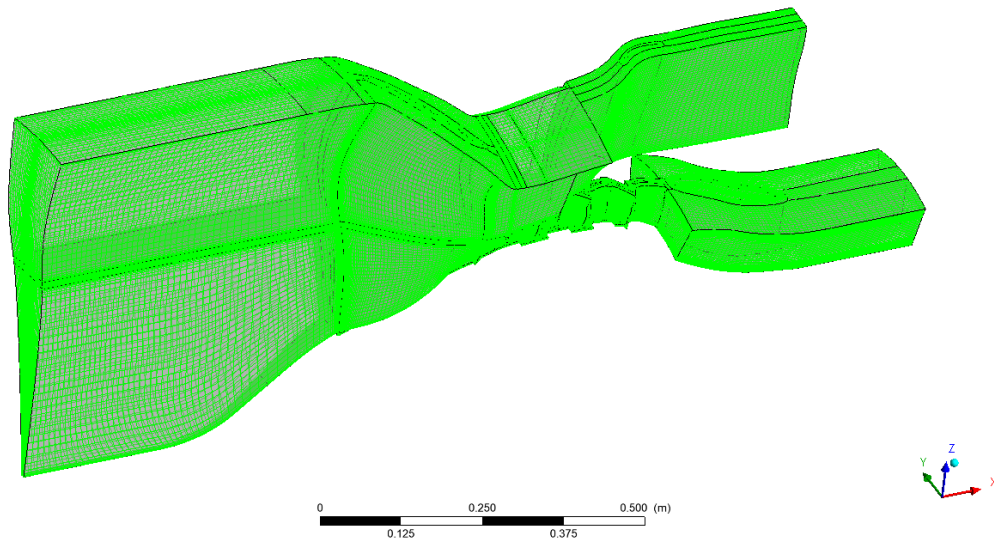


Рисунок 5.3 – Расчетная сетка для анализа аэродинамических характеристик компрессора низкого давления

Расчетная сетка содержит 2 369 536 элементов и 2 678 591 узел. Параметры сетки для каждого венца приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Количество узлов и элементов конечно-элементной сетки для всей расчетной области

Имя венца	Количество узлов	Количество элементов
fan	908756	819072
igv	96824	84480
ogv	168036	146944
r2	254793	223104
r3	247193	216192
r4		
s2	217664	190848
s3	181336	157056
s4	183728	158976
st	173068	156672

Как показывает практика, расчетные сетки с подобными параметрами позволяют получить поле течения, приемлемое для определения интегральных характеристик.

### 5.1.3 Описание граничных условий

Расчетная область формировалась на основе сеток лопаточных венцов, импортированных из CFX TurboGrid. Граничные условия задавались на всех поверхностях модели и включали: условия непроницаемости на твердых стенках, параметры потока на входе и выходе ступени, периодические граничные условия на боковых границах каждого венца, а также интерфейсы сопряжения между вращающимися и неподвижными зонами. Геометрия боковых периодических границ межлопаточного канала соответствует средней линии профиля лопатки.

При расчете аэродинамики внешнего контура влияние силовой стойки не учитывалось, так как ее присутствие оказывает пренебрежимо малое воздействие на интегральные характеристики.

Граничные условия и настройки решателя, использованные для определения интегральных характеристик упрощенной модели компрессора низкого давления, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Граничные условия и параметры решателя

Поле настройки	Вводимое значение/ настройка
Рабочее тело	AirIdealGas (воздух с параметрами идеального газа)
Тип решения	SteadyState (стационарный расчёт)
Опорное давление	1 [Па]
Модель теплопереноса	TotalEnergy (модель полной энергии, учитывающая изменение температуры при увеличении скорости газа)
Модель турбулентности	k-ε (двухпараметрическая модель турбулентности)
Степень турбулентности	0,02
Масштаб турбулентных вихрей	0,003 [м]
Полное давление на входе	101325 [Па]
Полная температура на входе	288,15 [К]
Порядок точности решателя	HighResolution (второй порядок точности)
Максимальное число итераций	1000000
Параметры сходимости	PhysicalTimescale (физический масштаб времени – 0,0001 [с])
Критерий сходимости	$10^{-6}$

На выходе из расчетной области задавалось условие среднего по площади статического давления. Конкретное значение этого давления выбиралось исходя из положения рабочей точки на характеристике «расход – степень повышения полного давления» и требований к устойчивости численного решения (см. Рисунки 5.4 и 5.5).

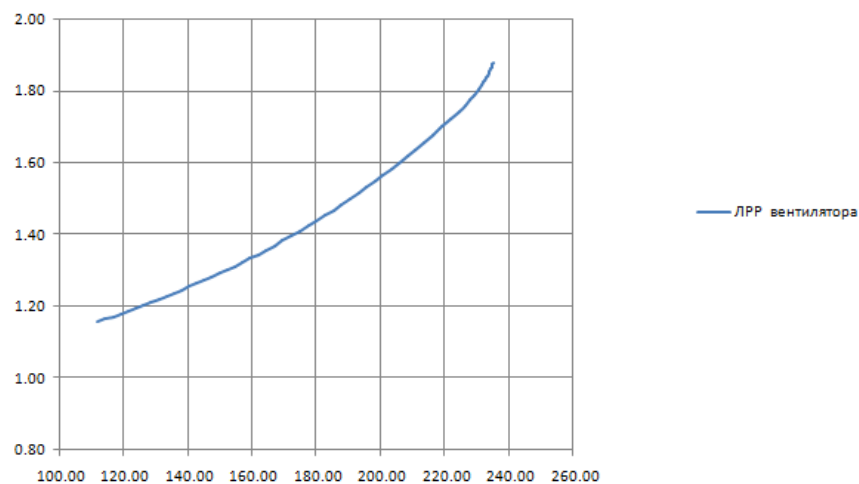


Рисунок 5.4 – График зависимости степени повышения давления от расхода воздуха для ступени вентилятора

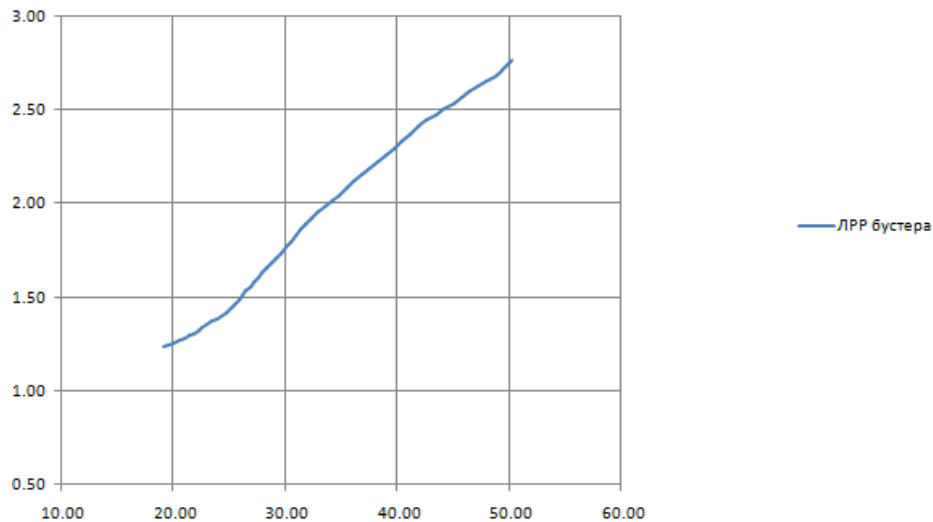


Рисунок 5.5 – График зависимости степени повышения давления от расхода воздуха для бустера

В соответствии с техническим заданием ПАО «ОДК-Сатурн» выполнен расчет напорных характеристик вентилятора для трех относительных частот вращения приведенной скорости:  $n=0,8$  (режим минимальных запасов газодинамической устойчивости),  $n=0,95$  (режим максимального КПД) и  $n=1,05$  (режим максимального расхода воздуха). Расчеты проведены вплоть до границы газодинамической устойчивости. Для получения интегральных характеристик рабочей лопатки на указанных режимах была выполнена серия аэродинамических расчетов.

Граничные условия для выбранных расчетных режимов представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Граничные условия на режимах:  $n=0.8$ ,  $n=0.95$ ,  $n=1.05$

Режим	Частота вращения $N$ , [об/мин]	Давление на выходе $R_{\text{вых.}}$ , [Па]		Степень повышения давления $\pi_k^*$		Массовый расход воздуха $G_v$ , [кг/с]	
		Степень вентилятора	Бустер	Степень вентилятора	Бустер	Степень вентилятора	Бустер
<b><math>n=0,8</math></b>	5191,18	148947,75	188464,50	1,47	1,86	185,41	31,45
<b><math>n=0,95</math></b>	6164,52	176305,50	240140,25	1,74	2,37	224,57	41,27
<b><math>n=1,05</math></b>	6813,42	187451,25	270537,75	1,85	2,67	233,84	48,55

Для возможности отслеживания изменений интегральных характеристик потока в процессе решения задаются переменные, которые позволяют рассчитывать данные параметры. В таблице 5.4 приведены выражения, записанные для данной расчетной модели.

Таблица 5.4 – Выражения для вычисления интегральных параметров потока

Параметр	Выражение
Расход воздуха на входе	$G_{inl}=24*\text{massFlow()}@inlet$
Расход воздуха на выходе из внешнего контура	$G_{outogv}=-76*\text{massFlow()}@ogv\ outlet$
Расход воздуха на выходе из внутреннего контура	$G_{outst}=-10*\text{massFlow()}@st\ outlet$
Степень повышения давления в ступени вентилятора	$P_{ifanogv}=\text{massFlowAve}(ptotstn)@ogvoutlet/\text{massFlowAve}(ptotstn)@inlet$
Степень повышения давления в бустере	$P_{ifans4}=\text{massFlowAve}(ptotstn)@stages4\ stSide\ 2/\text{massFlowAve}(ptotstn)@inlet$
Коэффициент полезного действия внешнего контура	$E_{fffanogv} = ((\text{massFlowAve}(ptotstn)@ogv\ outlet/\text{massFlowAve}(ptotstn)@inlet)^{0.28571-1})/(\text{massFlowAve}(Ttotstn)@ogv\ outlet/\text{massFlowAve}(Ttotstn)@inlet-1)$
Коэффициент полезного действия внутреннего контура	$E_{fffans4} = ((\text{massFlowAve}(ptotstn)@stage\ s4\ st\ Side\ 2/\text{massFlowAve}(ptotstn)@inlet)^{0.28571-1})/(\text{massFlowAve}(Ttotstn)@stage\ s4\ st\ Side\ 2/\text{massFlowAve}(Ttotstn)@inlet-1)$

Критерием сходимости решения служило снижение среднеквадратичных невязок до уровня  $10^{-6}$  и ниже, а также стабилизация интегральных характеристик. Указанная сходимость достигалась приблизительно за 250-500 шагов по времени.

#### 5.1.4 Особенности расчетного исследования

Расчет напорных веток для вентилятора на выбранных режимах выполняется до границы ГДУ, следовательно, возникает необходимость в пошаговом изменении среднего по площади выхода статического давления. Давление на выходе изменяется от атмосферного до давления, соответствующего границе ГДУ, и определяется рабочая точка вентилятора, расположенная на соответствующей ЛРР, приведенной на рисунке 5.4. После чего, аналогичным образом, выполняется поиск рабочей точки на ЛРР бустера (см. Рисунок 5.6).

Ступени компрессора проектируются и согласовываются между собой так, что на ЛРР компрессор работает близко к своему оптимуму в некоторой ограниченной области, называемой зоной расчетных режимов.

При выполнении аэродинамических расчетов напорных веток для вентилятора на режиме  $n=0,8$  (режим с минимальными запасами ГДУ), статическое давление на выходе из внешнего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 183000 [Па]. В свою очередь, давление на выходе из внешнего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 131000 [Па], а статическое давление на выходе из внутреннего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 183000 [Па]. Проведение аэродинамических расчетов с данными диапазонами давлений позволяет определить рабочие точки для вентилятора и КНД, лежащие на пересечении соответствующих напорных веток и ЛРР.

При выполнении аэродинамических расчетов напорных веток для вентилятора на режиме  $n=0,95$  (режим с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД)), статическое давление на выходе для всей расчётной модели изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 240000 [Па]. В свою очередь, давление на выходе из внешнего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 154000 [Па], а статическое давление на выходе из внутреннего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 240000 [Па]. Проведение аэродинамических расчетов с данными диапазонами давлений позволяет определить рабочие точки для вентилятора и КНД, лежащие на пересечении соответствующих напорных веток и ЛРР.

При выполнении аэродинамических расчетов напорных веток для вентилятора на режиме  $n=1,05$  (режим с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД)), статическое давление на выходе для всей расчетной модели изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 236000 [Па]. В свою очередь, давление на выходе из внешнего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 170000 [Па], а статическое давление на выходе из внутреннего контура изменялось в диапазоне от 101325 [Па] до 236000 [Па]. Проведение аэродинамических расчётов с данными диапазонами давлений позволяет определить рабочие точки для вентилятора и КНД, лежащие на пересечении соответствующих напорных веток и ЛРР.

Определение каждого диапазона среднего по площади выхода статического давления осуществлялось путем выполнения серии аэродинамических расчетов на каждом из выбранных режимов с анализом интегральных характеристик после каждого выполненного расчета, с последующим определением величины статического давления для достижения границы газодинамической устойчивости.

### 5.1.5 Результаты аэродинамических расчетов

В таблице 5.5 представлены основные интегральные характеристики, полученные в рабочих точках. Так как на режиме  $n=1,05$  отсутствует пересечение напорной ветки и ЛРР вентилятора, что обусловлено нехваткой исходных данных, на основании которых построена ЛРР, интегральные характеристики на данном режиме представлены лишь для бустера. Анализ кривой позволяет предположить, что такое пересечение имеет место в точке с массовым расходом воздуха  $G_v=236,40$  [кг/с] и степенью повышения полного давления  $\pi_k^*=1,92$  (см. Рисунок 5.6).

Таблица 5.5 – Интегральные характеристики расчетной модели

Режим	Степень повышения полного давления $\pi_k^*$		Массовый расход воздуха $G_{\theta}$ , [кг/с]		Коэффициент полезного действия $\eta_k^*$		Коэффициент газодинамической устойчивости $\Delta K_y$ , %	
	Степень вентилятора	Бустер	Степень вентилятора	Бустер	Внутренний контур	Внешний контур	Степень вентилятора	Бустер
<b>n=0,8</b>	1,48	1,92	188,30	32,57	0,75	0,89	9,39	6,13
<b>n=0,95</b>	1,75	2,45	225,73	43,03	0,74	0,90	3,67	12,27
<b>n=1,05</b>	-	2,74	-	49,81	0,85	-	-	10,76

Для каждого значения расхода воздуха через ступень  $G_{\theta}$  и частоты вращения  $n$  (точка на характеристике) определяется: степень повышения полного давления  $\pi_k^*$  (5.1), коэффициент полезного действия  $\eta_k^*$  (5.2), а также коэффициент газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  (5.3).

$$\pi_k^* = \frac{P_2^*}{P_1^*}, \quad (5.1)$$

где  $P_1^*$  – полное среднемассовое давление на входе,  $P_2^*$  – полное среднемассовое давление на выходе.

$$\eta_k^* = \frac{\pi_k^{*k} - 1}{\frac{T_2^*}{T_1^*} - 1}, \quad (5.2)$$

где  $k$  – показатель адиабаты (в данных расчётах принято  $k=1.4$ );  $T_1^*$  – полная среднемассовая температура на входе;  $T_2^*$  – полная среднемассовая температура на выходе.

$$\Delta K_y = \left( \frac{\pi_{k,зр}^* / G_{\theta,зр}}{\pi_{k,раб}^* / G_{\theta,раб}} - 1 \right) * 100\%, \quad (5.3)$$

где  $\pi_{k,зр}^*$  – степень повышения давления на границе устойчивости,  $G_{\theta,зр}$  – расход воздуха на границе устойчивости,  $\pi_{k,раб}^*$  – степень повышения давления в рабочей точке,  $G_{\theta,раб}$  – расход воздуха в рабочей точке.

Расчет напорных веток на различных режимах позволяет определить рабочие точки, расположенные на пересечении ЛРР вентилятора и напорных веток, которые в дальнейшем будут участвовать в процессе оптимизации. Определение рабочих точек для бустера осуществляется аналогичным образом.

На рисунках 5.6 и 5.7 представлены ЛРР вентилятора и бустера с рассчитанными напорными ветками на режимах:  $n=0,8$ ,  $n=0,95$ ,  $n=1,05$ , а также ветви КПД для каждого режима.

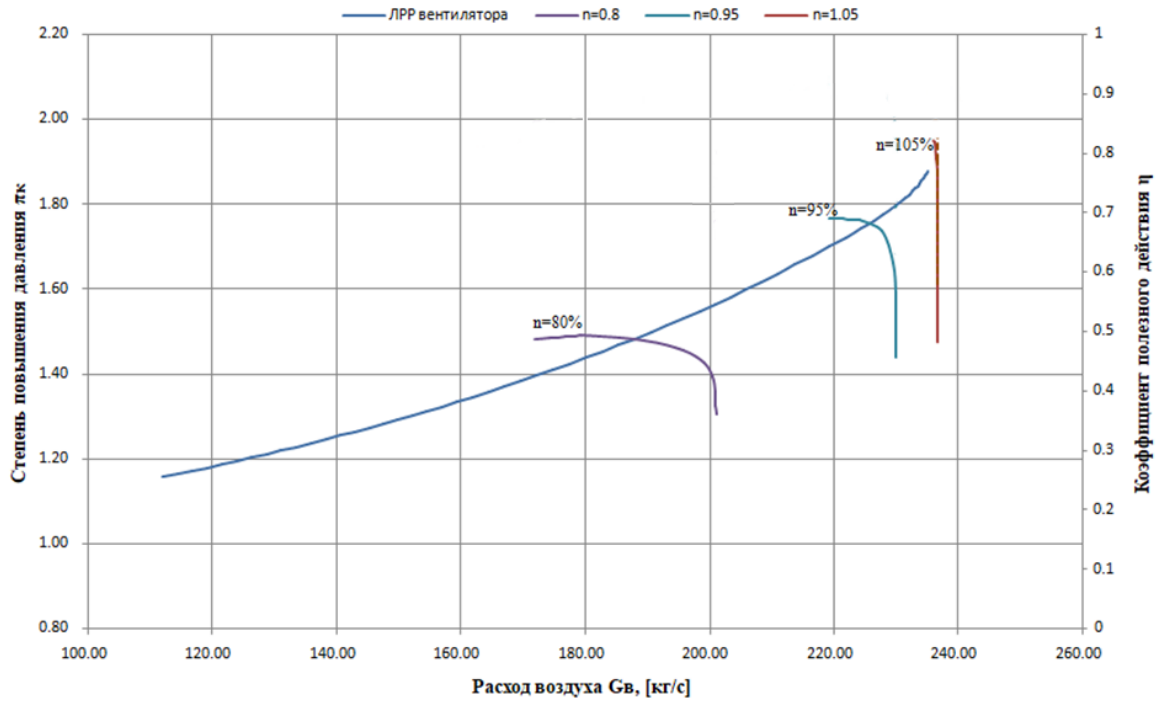


Рисунок 5.6 – ЛРР вентилятора с рассчитанными напорными ветками

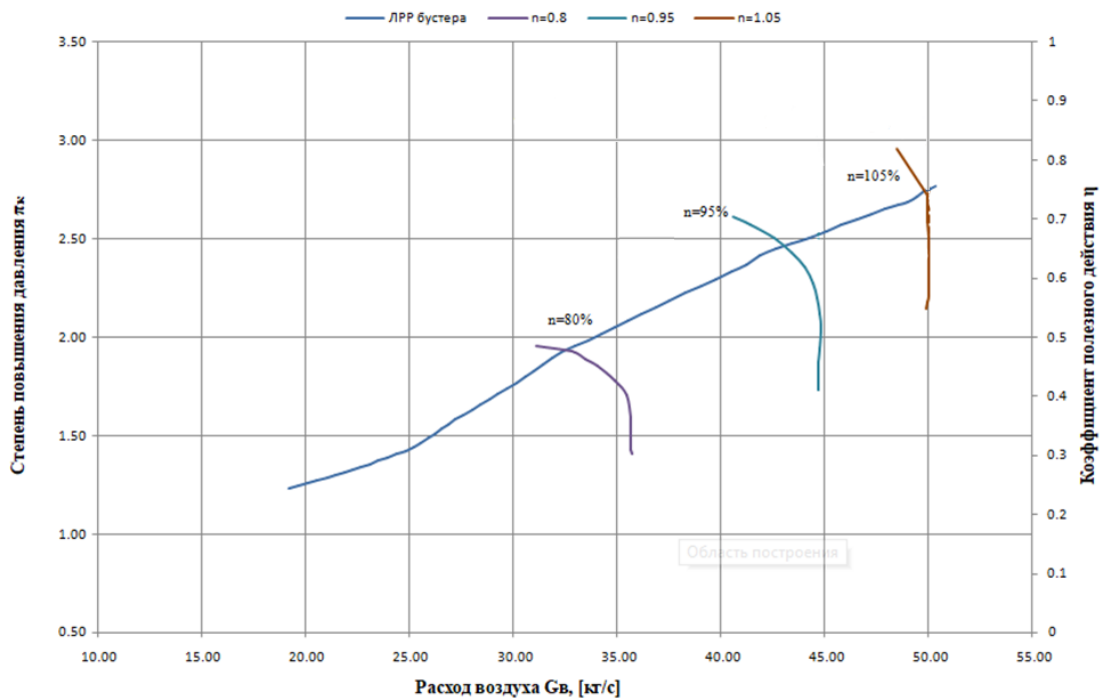


Рисунок 5.7 – ЛРР бустера с рассчитанными напорными ветками

В целях оптимизации вычислительных ресурсов численного исследования аэродинамических характеристик комплекта из 37 лопаток вентилятора в «горячем» состоянии, предлагается перейти от полной геометрической модели к упрощенной. Ключевым шагом является замена деталей внутреннего контура (бустера и силовой стойки) эквивалентными граничными условиями.

Обоснование перехода:

1. **Локализация целевых параметров.** Основным объектом исследования являются газодинамические и прочностные характеристики вентилятора. Влияние геометрии бустера и стойки на интегральные параметры вентилятора носит вторичный характер и может быть описано через граничные условия на входе/выходе соответствующих трактов.

2. **Снижение размерности задачи.** Исключение сложной геометрии внутренних элементов значительно уменьшает количество узлов конечно-элементной сетки и уравнений в системе, что критически важно для итерационных процессов расчетного исследования.

3. **Сохранение точности.** Верификация подтверждает, что такой подход обеспечивает сохранение точности оценки целевых функций вентилятора при сокращении времени расчета.

## 5.2 Аэродинамический расчет рабочих лопаток вентилятора «горячей» формы

### 5.2.1 Описание расчетной модели

Расчетная модель, применяемая для проведения аэродинамических исследований, представляет собой геометрически упрощенное физическое представление проточной части вентиляторной ступени, включающее ключевые элементы: втулку, внутренний и наружный обводы, область входа в ступень вентилятора, профиль рабочей лопатки, а также участок проточной части за лопаточным венцом, соответствующий выходной зоне (см. Рисунок 5.8).

Такая степень идеализации геометрии обусловлена необходимостью обеспечения вычислительной эффективности численного моделирования при одновременном сохранении адекватного воспроизведения основных физических процессов, протекающих в межлопаточном канале, включая развитие пограничного слоя, формирование вторичных течений и распределение давления по профилю лопатки.

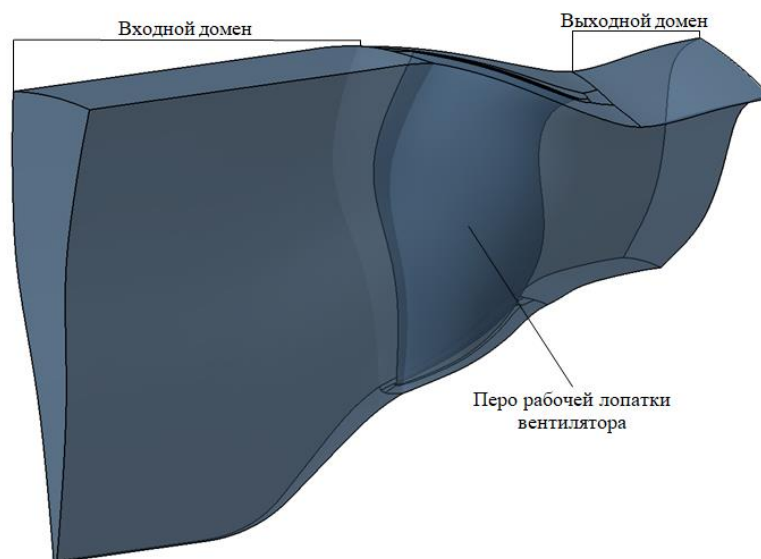


Рисунок 5.8 – Геометрическая модель расчетной области рабочей лопатки вентилятора

Учет влияния остальных 23 межлопаточных каналов обеспечивается за счет применения периодических граничных условий на боковых гранях расчетной области. Это позволяет моделировать течение в одном канале с сохранением корректного отражения симметрии потока в полной окружности лопаточного венца. При проведении серии расчетов для различных геометрических вариантов в общей расчетной модели заменяется исключительно перо лопатки, в то время как все остальные элементы обводы проточной части, границы входа и выхода остаются неизменными, что способствует обеспечению сопоставимости результатов.

При построении расчетной модели приняты следующие допущения:

- течение в лопаточном венце обладает циклической симметрией, поэтому моделирование выполняется для одного межлопаточного канала с применением периодических граничных условий на боковых поверхностях;

- радиальные границы расчетной области задаются по цилиндрическим поверхностям, совпадающим с втулочным и периферийным обводами проточной части.

Модель учитывает наличие радиальных зазоров над рабочими лопатками, что позволяет адекватно моделировать перетечки через верхние торцевые уплотнения и их влияние на аэродинамические характеристики ступени.

Дискретизация расчетной области выполнена с использованием блочно-структурированной сетки, построенной в модуле AutoGrid программного комплекса NUMECA.

### **5.2.2 Описание конечно-элементной сетки расчетной модели**

Построение конечно-элементной сетки выполняется в модуле AutoGrid программного комплекса NUMECA с использованием комбинированного подхода: в окрестности поверхности рабочих лопаток формируется многоблочная O-сетка, обеспечивающая высокое разрешение пограничного слоя, в то время как в межлопаточных каналах применяется многоблочная H-сетка, оптимизированная для эффективного моделирования основного потока. Полученная расчетная сетка является блочно-структурированной и состоит исключительно из гексаэдрических (шестигранных) конечных объемов, что способствует повышению точности и устойчивости численного решения.

Конечно-элементные сетки для всех расчетных случаев строятся в автоматическом режиме, что достигается за счет использования параметрических шаблонов и встроенных алгоритмов автоматизации модуля AutoGrid. Пользователю достаточно задать ключевые параметры (размер первого слоя, коэффициент роста, число ячеек по каждому направлению), после чего сеточный генератор самостоятельно формирует блочно-структурированную сетку для заданной геометрии без ручного вмешательства в процесс разбиения. Это обеспечивает высокую

воспроизводимость результатов и существенно сокращает трудозатраты при проведении многовариантных расчетов.

Для адекватного разрешения пограничного слоя вблизи твердых стенок, включая поверхности профиля, втулки и обводов, предусмотрено значительное сгущение сетки по нормали к поверхности. Первый слой ячеек устанавливается с размером  $5 \times 10^{-6}$  м, что обеспечивает значение безразмерной высоты первой ячейки  $y^+ \approx 1$ , необходимое для корректного применения моделей турбулентности, основанных на детальном разрешении вязкого подслоя. Отношение роста ячеек по нормали к стенке принято равным 1,5, что позволяет плавно увеличивать размеры ячеек вглубь потока, сохраняя баланс между точностью и вычислительной эффективностью.

Для обеспечения высокого качества сетки используются стандартные шаблоны разбиения межлопаточного канала, а также применяются инструменты адаптивного сглаживания и деформации структурных блоков, позволяющие минимизировать искажения ячеек и оптимизировать их форму. Минимальный угол скошенности в расчетной сетке составляет  $17,8^\circ$ , что свидетельствует о высоком качестве дискретизации и пригодности сетки для проведения точных газодинамических расчетов.

Общее количество конечных объемов в расчетной модели составляет порядка 1,1 млн, что обеспечивает достаточную детализацию течения при сохранении разумных временных затрат на решение. Общий вид сгенерированной сетки, используемой для газодинамического анализа рабочей лопатки вентилятора в «горячей» конфигурации, представлен на рисунке 5.9.

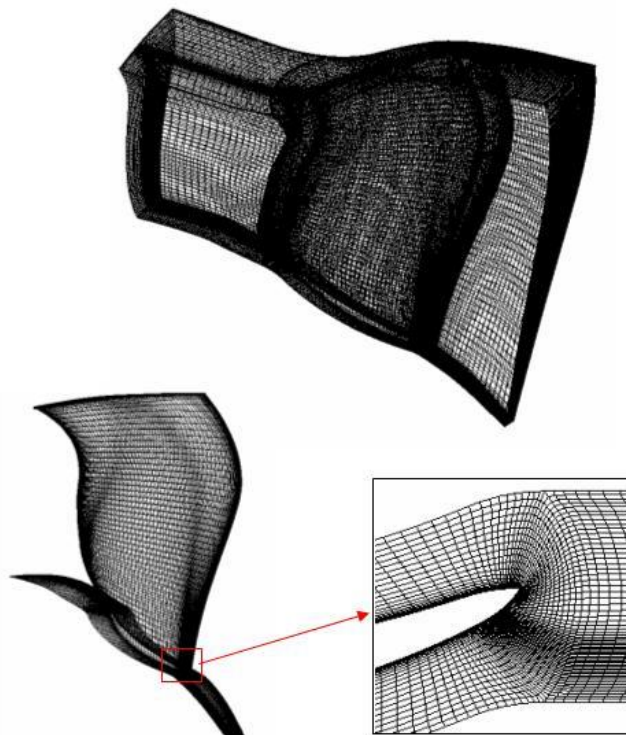


Рисунок 5.9 – Общий вид конечно-элементной сетки для аэродинамических расчетов

Анализ результатов предварительных расчетов показал, что сетки с подобными характеристиками позволяют получать достоверное поле течения, достаточное для корректной оценки интегральных аэродинамических параметров ступени, таких как степень повышения давления, расход воздуха, КПД и тяга. Все последующие варианты лопаток, рассматриваемые в рамках исследуемой серии, генерируются с использованием аналогичных настроек сеточной дискретизации, что обеспечивает сопоставимость результатов и исключает влияние вариаций сетки на итоговые характеристики.

Аэродинамическое моделирование осуществляется в модуле Fine/Turbo программного комплекса NUMECA с использованием метода конечных объемов и решения уравнений Навье-Стокса. По результатам численного эксперимента определяются значения критериев оптимизации, подлежащих улучшению в рамках проводимого исследования как за счет максимизации эффективности и устойчивости потока, так и за счет минимизации потерь и неравномерности параметров на выходе из ступени.

### **5.2.3 Описание граничных условий модели**

Задание числовых значений граничных условий, настройка численного решателя и реализация расчетного процесса выполняются в модуле Fine/Turbo программного комплекса NUMECA. Моделирование течения в ступени вентилятора проводится в установленном режиме с использованием трехмерных уравнений сохранения для сжимаемой вязкой среды.

В качестве рабочего тела принимается воздух, поведение которого описывается моделью идеального газа. На входной границе расчетной области задается осевой поток (угол потока  $\alpha=0^\circ$ ) с фиксированными значениями полного давления и полной температуры. На выходе из расчетной области задано граничное условие статического давления, соответствующее номинальному режиму работы ступени. Такая постановка граничных условий типична для аэродинамического анализа вентиляторных ступеней и обеспечивает устойчивую сходимость решения при сохранении физической достоверности.

Численные значения граничных условий, а также параметры численного решателя, примененные при расчете интегральных характеристик рабочей лопатки вентилятора в «горячей» конфигурации, приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Граничные условия и параметры решателя

Поле настройки	Вводимое значение / настройка
Рабочее тело	Air(Perfect) (воздух с параметрами идеального газа)
Тип задачи	Steady (стационарный расчет)
Математический метод	Turbulent Navier-Stokes
Модель турбулентности	k-ε (Extended Wall Function)
Частота вращения	6164,52 [об/мин] (режим n=95%)
Полное давление на входе	101325 [Па]
Полная температура на входе	288,15 [K]
Параметры, характеризующие турбулентность входящего потока	Epsilon=30000 [ $\frac{m^2}{s^3}$ ]
	k=5 [ $\frac{m^2}{s^2}$ ]
Статическое давление на выходе	101325...125000 [Па]
CFL number (число Куранта)	3
Current grid level (текущий уровень сетки)	0 0 0

Для описания течения вязкого сжимаемого газа используется полная система уравнений Навье-Стокса, записанных в форме, учитывающей движение в неинерциальной (вращающейся) системе координат [122] (5.4-5.7):

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot \rho + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \rho \cdot u_j = 0 \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \rho \cdot u_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\rho \cdot u_i \cdot u_j + p \cdot \delta_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \tau_{ij} - \rho \cdot \epsilon_{ijk} \\ \cdot (\omega_j \cdot (\epsilon_{klm} \cdot \omega_l \cdot r_m + +2 \cdot u_k)) = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot e + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (e + p) \cdot u_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left( k \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot T + \tau_{jk} \cdot u_k \right) - Q = 0 \quad (5.6)$$

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot u_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot u_i \right) + \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \frac{\partial}{\partial x_k} \cdot u_k \quad (5.7)$$

Здесь  $\rho$  – плотность;  $u_i$  – компоненты вектора скорости;  $e$  – полная удельная энергия;  $T$  – абсолютная температура;  $p$  – давление;  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора вязких напряжений;  $\mu$  – коэффициент вязкости;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\omega_i$  – вектор угловой скорости вращающейся системы координат;  $Q$  – тепловыделение различной физической природы.

Приведенная система уравнений выражает фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии. Для замыкания системы используется модель турбулентности SST, обеспечивающая высокую точность при моделировании отрыва потока, пограничных слоев и трансзвуковых течений, характерных для лопаточных машин.

Критерием достижения сходимости численного решения принимается снижение среднеквадратичной невязки всех решаемых уравнений до уровня  $10^{-6}$  и ниже, в совокупности с установлением (стабилизацией во времени) ключевых интегральных характеристик степени повышения давления, массового расхода, КПД и других параметров, определяющих энергетическую эффективность ступени.

#### 5.2.4 Особенности расчетного исследования

Методика проведения газодинамических расчетов предусматривает серию численных экспериментов, включающую анализ 37 модифицированных моделей рабочих лопаток вентилятора в «горячей» конфигурации. Каждая модель характеризуется уникальным набором геометрических параметров, зафиксированных как на «правой», так и на левой границе установленных производственных допусков, что позволяет оценить влияние предельных отклонений формы на аэродинамические характеристики ступени.

Особенностью расчетной методики, примененной в настоящей работе, является то, что одно обращение к математической модели включает проведение шести расчетных случаев, соответствующих различным точкам под нагрузкой на характеристике вентилятора при частоте вращения  $n=0,95$  от номинальной (режим, близкий к максимальному КПД – оптимальный режим эксплуатации). Формирование кривой характеристик осуществляется путем последовательного изменения статического давления на выходной границе расчетной области, что имитирует работу ступени на различных участках расходно-напорной характеристики от режима, близкого к помпажу, до режима максимального расхода.

Такой подход обеспечивает комплексную оценку влияния геометрических отклонений не только на номинальный режим работы, но и на устойчивость и эффективность ступени в широком диапазоне эксплуатационных условий, что является важным аспектом при анализе чувствительности и последующей оптимизации лопаточной системы.

#### 5.2.5 Результаты аэродинамических расчетов

В качестве интегральных характеристик для анализа результатов газодинамических расчетов рабочих лопаток вентилятора в «горячей» конфигурации выбраны ключевые энергетические и расходные параметры, определяющие функциональные и эксплуатационные свойства ступени. К ним относятся:

- расход воздуха,  $G_v$  [кг/с];
- степень повышения давления,  $\pi_k^*$ ;
- коэффициент полезного действия,  $\eta_k^*$ ;
- тяга,  $P$  [Н].

Указанные параметры позволяют комплексно оценить аэродинамическое качество лопаточной системы, ее энергетическую эффективность, запас устойчивости и работоспособность в условиях эксплуатационных отклонений геометрии. Численные значения интегральных характеристик для всех рассчитанных вариантов представлены в таблице 5.7. Максимальные значения (по сравнению с номинальной моделью) выделены красным цветом, минимальные – синим, что обеспечивает наглядную визуализацию влияния геометрических отклонений на выходные характеристики.

Таблица 5.7 – Результаты аэродинамических расчетов комплекта «горячих» моделей рабочей лопатки вентилятора

Имя модели	Расход воздуха, Gв [кг/с]	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, P [Н]
0_H (номинал)	222,28	1,7214	0,9159	11360
1_H min	224,58	1,7120	0,9173	11256
2_H min	223,93	1,7111	0,9161	11225
3_H min	224,48	1,7109	0,9174	11239
4_H min	224,62	1,7119	0,9174	11222
5_H min	224,39	1,7113	0,9172	11219
6_H min	224,53	1,7108	0,9177	11216
7_H min	224,10	1,7150	0,9180	11463
8_H min	222,93	1,7092	0,9179	11187
9_H min	222,80	1,7106	0,9169	11185
10_H min	224,63	1,7122	0,9172	11251
11_H min	224,63	1,7119	0,9173	11243
12_H min	224,70	1,7118	0,9175	11254
13_H min	224,52	1,7117	0,9174	11243
14_H min	224,55	1,7116	0,9174	11239
15_H min	224,55	1,7113	0,9176	11234
16_H min	224,58	1,7117	0,9174	11244
17_H min	224,64	1,7113	0,9176	11235
18_H min	224,68	1,7115	0,9176	11243
1_H max	219,98	1,7308	0,9145	11464
2_H max	220,63	1,7317	0,9157	11495
3_H max	220,08	1,7319	0,9144	11491
4_H max	219,94	1,7309	0,9144	11498
5_H max	220,17	1,7315	0,9146	11501
6_H max	220,03	1,7320	0,9141	11504
7_H max	220,46	1,7278	0,9138	11257
8_H max	221,63	1,7336	0,9139	11533
9_H max	221,76	1,7322	0,9149	11535
10_H max	219,93	1,7306	0,9146	11469
11_H max	219,93	1,7309	0,9145	11477
12_H max	219,86	1,7310	0,9143	11466
13_H max	220,04	1,7311	0,9144	11477
14_H max	220,01	1,7312	0,9144	11481
15_H max	220,01	1,7315	0,9142	11486
16_H max	219,98	1,7311	0,9144	11476
17_H max	219,92	1,7315	0,9142	11485
18_H max	219,88	1,7313	0,9142	11477

Примечание: индекс «Н» в обозначении модели указывает на «горячее» состояние геометрии.

В качестве примера на рисунках 5.10-5.12 приведены результаты аэродинамического моделирования «горячих» моделей рабочей лопатки вентилятора варианта «9\_N\_max». Подробные геометрические характеристики данной лопатки приведены в таблице 3.1 раздела 3.1.2. Представлены распределения безразмерных полей чисел Маха, статического давления и статической температуры в среднем по высоте профиля сечении межлопаточного канала. Данные визуализации позволяют проанализировать структуру течения, выявить зоны сверхзвуковых скоростей, застоев, отрывов потока и перетечек, а также оценить степень неоднородности параметров на выходе из ступени.

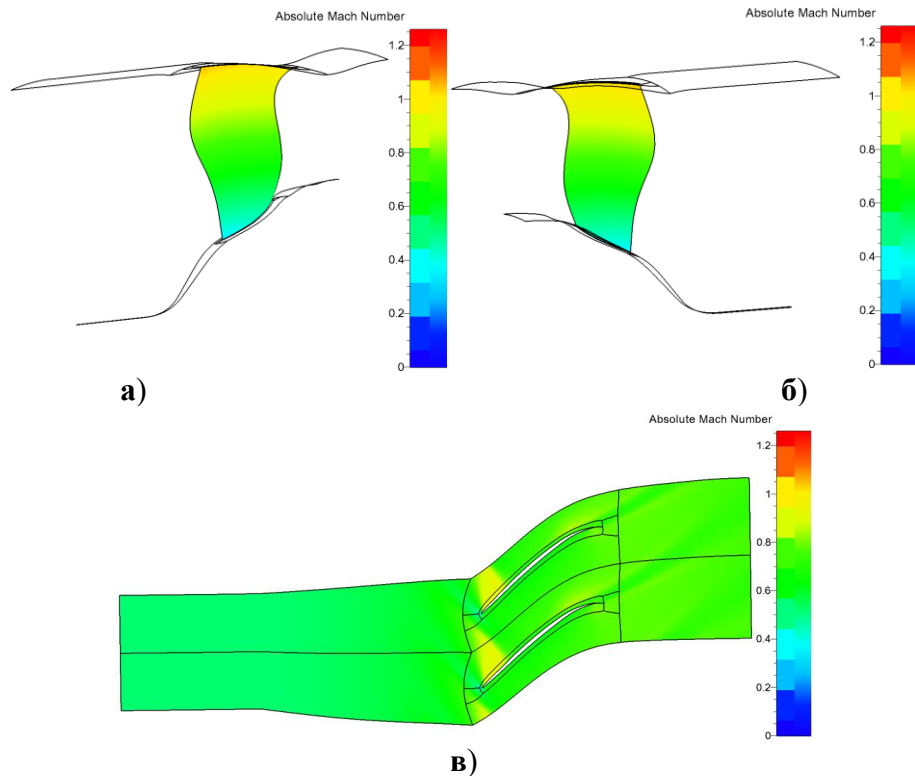


Рисунок 5.10 – Распределение полей числа Маха в абсолютном движении  
(а – поверхность спинки; б – поверхность корыта; в – среднее сечение по высоте лопатки)

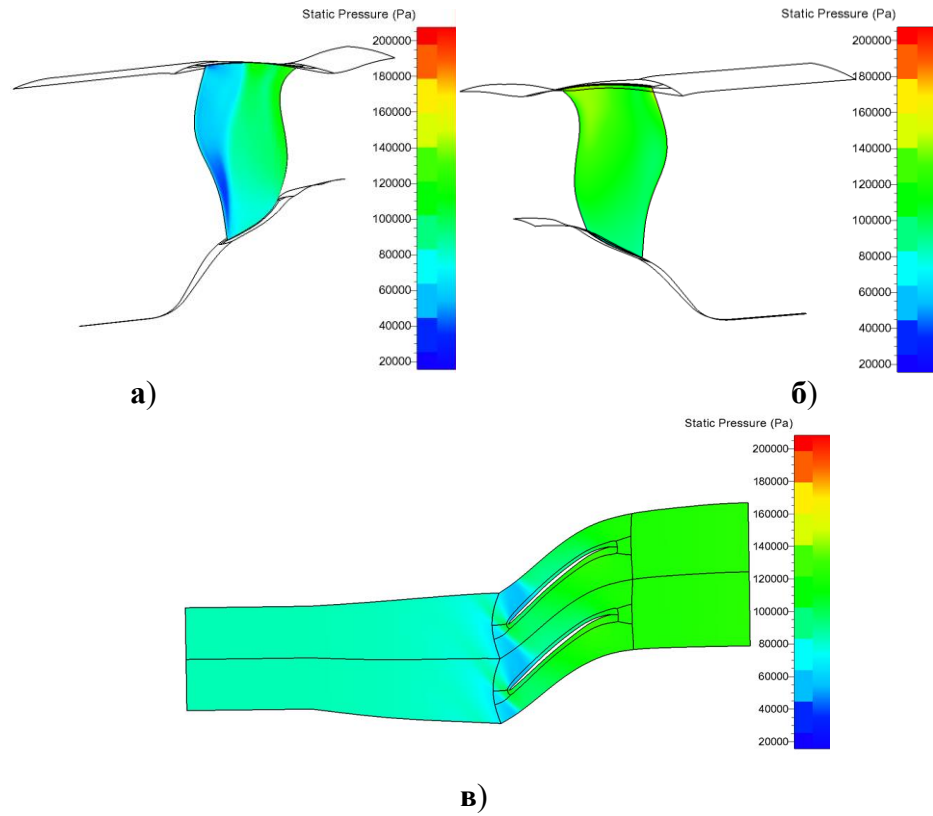


Рисунок 5.11 – Распределение полей статического давления  
 (а – поверхность спинки; б – поверхность корыта; в – среднее сечение по высоте лопатки)

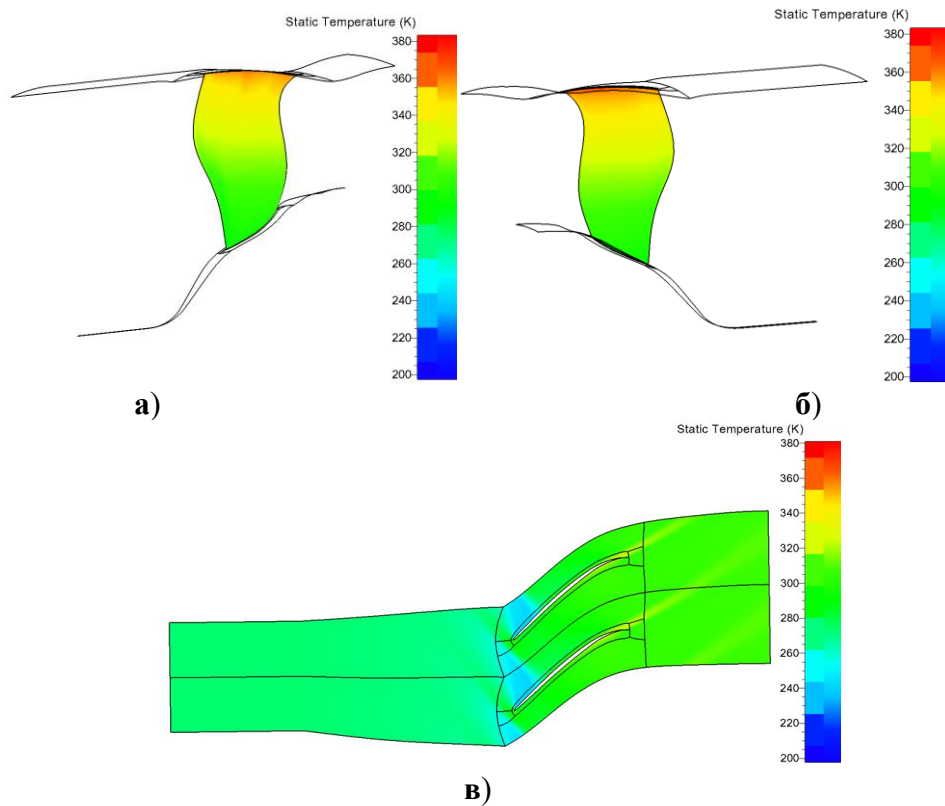


Рисунок 5.12 – Распределение полей температур  
 (а – поверхность спинки; б – поверхность корыта; в – среднее сечение по высоте лопатки)

### **5.3 Анализ чувствительности аэродинамических показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям**

#### **5.3.1 Постановка задачи анализа чувствительности аэродинамических показателей**

Анализ чувствительности представляет собой важный этап многодисциплинарного исследования, направленный на установление зависимостей между варьируемыми геометрическими переменными (см. Таблица 3.1 раздела 3.1.2) рабочей лопатки вентилятора и результирующими аэродинамическими характеристиками вентиляторной ступени. Базовые численные значения аэродинамических показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора, принятые за точку отсчета при анализе чувствительности, приведены в таблице 5.7 раздела 5.2.5. Количественная оценка отклика системы на геометрические отклонения позволяет определить степень влияния отдельных геометрических параметров на энергетическую эффективность и аэродинамическую устойчивость ступени, а также выявить наиболее чувствительные к технологическим допускам зоны профиля.

Расчетные исследования выполняются на основе параметризованной модели межлопаточного канала, включающей перо рабочей лопатки и граничные обводы проточной части – втулочный и периферийный контуры. Моделирование проводится с использованием «горячей» геометрии лопатки, построенной с учетом деформаций, возникающих под действием эксплуатационных нагрузок. При реализации анализа чувствительности каждый варьируемый параметр последовательно устанавливается на «правую» и/или «левую» границу установленного технологического допуска, что позволяет оценить характер и амплитуду изменения аэродинамических показателей при экстремальных, но реализуемых в производстве, отклонениях геометрии.

Одним из ключевых результатов анализа является установление линейной или слабо нелинейной зависимости между геометрическими параметрами лопатки в «горячем» состоянии и интегральными аэродинамическими характеристиками, что

Такой подход способствует значительному повышению вычислительной эффективности, ускоряет процессы проектирования и оптимизации, а также закладывает основу для вероятностного анализа надежности и устойчивости лопаточной машины с учетом реальной дисперсии геометрических параметров в условиях серийного производства.

#### **5.3.2 Варьируемые геометрические переменные анализа чувствительности аэродинамических показателей**

Состав варьируемых геометрических параметров для анализа чувствительности формировался на основе статистической обработки данных измерений реальной партии рабочих лопаток вентилятора (см. Таблица 3.1 раздела 3.1.2). Такой подход позволил идентифицировать

параметры, наиболее подверженные производственным разбросам, и оценить их влияние на эксплуатационные характеристики.

В контексте модернизации существующей ступени в качестве варьируемых величин приняты предельные отклонения геометрии от номинала, соответствующие границам технологических допусков («правым» и «левым»). Это обеспечивает оценку работоспособности конструкции в наихудших условиях, характерных для крайних проявлений производственной дисперсии. При этом перечень варьируемых переменных не является жестко фиксированным и может адаптироваться в зависимости от целей исследования, стабильности производства и степени влияния конкретных параметров на аэродинамику и прочность.

### **5.3.3 Результаты анализа чувствительности аэродинамических показателей**

В данном разделе представлены результаты анализа чувствительности аэродинамических характеристик рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям, вызванным технологическим разбросом при производстве. Исследование выполнено на основе параметрических конечно-элементных моделей лопаток в «горячем» состоянии. Такой подход позволяет систематически оценивать влияние вариаций ключевых геометрических параметров (угла установки, толщины профиля, положения центра тяжести) на эффективность вентиляторной ступени с учетом действия эксплуатационных нагрузок, включая центробежные и температурные воздействия.

В таблице 5.8 представлены коэффициенты чувствительности варьируемых геометрических параметров к основным аэродинамическим характеристикам рабочей лопатки вентилятора (см. Таблица 5.7 раздела 5.2.5). Коэффициенты определены как относительные отклонения исследуемых показателей от их номинальных значений, соответствующих базовой геометрии. Все значения приведены в процентах, что обеспечивает сопоставимость влияния различных параметров на выходные характеристики системы. Максимальные отклонения выделены красным цветом, минимальные (в том числе отрицательные) – синим, относительно номинала, что позволяет визуально оценить степень влияния каждого геометрического фактора и выявить наиболее критичные параметры с точки зрения эффективности.

Таблица 5.8 – Коэффициенты влияния варьируемых геометрических переменных на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Имя модели	Расход воздуха, Гв	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, Р
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

Примечание: индекс «Н» в обозначении модели указывает на «горячее» состояние геометрии.

На основании проведенного анализа чувствительности аэродинамических характеристик рабочей лопатки вентилятора к геометрическим отклонениям, установлены следующие закономерности:

1. Наиболее значимое влияние на изменение массового расхода воздуха вентиляторной ступени оказывает варьирование максимальной толщины профиля  $E-0,25$  и  $E+0,25$  мм в 90%-м сечении по высоте лопатки (модели 12\_Н\_min и 12\_Н\_max). Для данных конфигураций зафиксированы экстремальные отклонения расхода относительно номинального значения. Коэффициент влияния достигает 1,09%: при уменьшении толщины профиля ( $E-0,25$ ) массовый расход возрастает с 222,28 кг/с до 224,70 кг/с, тогда как при его увеличении ( $E+0,25$ ) наблюдается снижение расхода до 219,86 кг/с. Данный эффект обусловлен изменением аэродинамического

сопротивления межлопаточного канала и перераспределением скоростного поля в проточной части. Уменьшение максимальной толщины профиля приводит к снижению блокирующего эффекта, уменьшению градиентов давления по поверхностям корыта и спинки, как следствие, к разгрузке канала, что способствует увеличению пропускной способности ступени. Напротив, увеличение толщины усиливает блокировку потока, способствует более раннему развитию пограничного слоя и повышает вероятность локальных отрывов, что ограничивает расход и может снижать устойчивость работы ступени.

2. Варьирование угла установки  $\Theta - 0,55^\circ$  и  $\Theta + 0,55^\circ$  в 75-м сечении по высоте лопатки (модели 8\_H\_min и 8\_H\_max) оказывает существенное влияние на степень повышения полного давления вентиляторной ступени. Максимальное снижение данного параметра составляет  $-0,71\%$  ( $\pi_k^* = 1,7092$  по отношению к номинальному значению  $\pi_k^* = 1,7214$ ), в то время как максимальное увеличение достигает  $0,71\%$  ( $\pi_k^* = 1,7336$ ). Полученные результаты демонстрируют выраженную и практически симметричную зависимость степени сжатия от угла установки профиля, что свидетельствует о высокой чувствительности аэродинамического напора к изменению угла атаки потока в средних и периферийных сечениях рабочей лопатки. Увеличение угла установки приводит к более интенсивному обтеканию профиля и повышению разности давлений между поверхностями спинки и корыта, что способствует росту степени повышения давления. Напротив, его уменьшение снижает эффективность лопатки как лопаточного элемента, формирующего закрутку потока, что приводит к разгрузке ступени и падению напорных свойств.

3. Аналогичная закономерность наблюдается и в отношении коэффициента полезного действия. Варьирование угла установки  $\Theta - 0,55^\circ$  и  $\Theta + 0,55^\circ$  в 45-м сечении по высоте лопатки (модели 7\_H\_min и 7\_H\_max) приводит к изменению данного параметра на  $\pm 0,23\%$  относительного номинального значения  $\eta_k^* = 0,9174$ : минимальное значение составляет  $\eta_k^* = 0,9138$ , максимальное  $\eta_k^* = 0,9180$ . Установлено, что изменение угла установки в срединных сечениях лопатки оказывает неоднозначное влияние на уровень потерь в проточной части. Увеличение угла может способствовать более эффективному нарастанию давления при оптимальном обтекании, снижая относительные потери и повышая коэффициент полезного действия. В то же время чрезмерное отклонение в любую сторону от номинала может привести к отклонению угла атаки от расчетного, вызывая локальные отрывы пограничного слоя, рост трения и вихревых потерь, что снижает аэродинамическую эффективность.

4. С учетом того, что вентилятор компрессора низкого давления формирует значительную долю суммарной тяги газотурбинного двигателя, особенно в современных высокоэффективных энергоустановках с высокой степенью двухконтурности, целесообразно сосредоточить внимание на анализе влияния технологического разброса геометрии рабочих лопаток именно на тяговые характеристики ступени. Количественная оценка чувствительности удельной тяги к

геометрическим отклонениям позволяет выявить потенциальные риски снижения энергетической эффективности двигателя и способствует обоснованному выбору критериев оптимального проектирования, направленных на обеспечение стабильности эксплуатационных показателей в условиях серийного производства.

Наибольшее влияние на изменение удельной тяги вентиляторной ступени оказывает варьирование угла установки  $\Theta - 0,55^\circ$  и  $\Theta + 0,55^\circ$  в периферийном сечении рабочей лопатки (модели 9\_C\_min и 9\_C\_max). Для данных конфигураций зафиксированы экстремальные отклонения тягового усилия относительно номинального значения. Коэффициент влияния достигает 1,54%. При уменьшении угла установки наблюдается снижение тяги с 11360 Н до 11185 Н, в то время как при его увеличении тяга возрастает до 11535 Н. Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность тягового параметра к геометрии лопатки в зоне максимальных скоростей и указывают на критическую важность точного контроля угла установки в периферийных сечениях при изготовлении и сборке.

Результаты выполненного анализа чувствительности позволяют выявить наиболее чувствительные геометрические параметры, определяющие эффективность рабочей лопатки вентилятора, и сформировать репрезентативный набор моделей для последующей проверки симметрии коэффициентов чувствительности.

#### **5.3.4 Проверка зависимости между варьируемыми геометрическими переменными и аэродинамическими показателями**

Для установления зависимости между варьируемыми геометрическими переменными рабочей лопатки вентилятора и ее аэродинамическими характеристиками, а также для построения аппроксимированной модели, пригодной для экспресс-оценки влияния производственных отклонений, были построены графические зависимости, отражающие чувствительность ключевых показателей эффективности к изменениям геометрии (см. Приложение Г) [123]. По оси ординат отложены коэффициенты влияния, определяемые как относительные отклонения интегральных параметров (расхода, степени повышения давления, КПД и тяги) от номинальных значений, по оси абсцисс значения варьируемых геометрических переменных, смещенных как в сторону «правой», так и «левой» границы допусков.

Наиболее значимые графические зависимости представлены на рисунках 5.13 и 5.14. Учитывая вклад вентилятора КНД в общую тягу, проанализирована чувствительность характеристик к геометрии лопаток. Варьирование угла установки в срединном сечении (мод. 7\_Н) изменяет КПД незначительно ( $\pm 0,23\%$ , диапазон 0,9138-0,9180) из-за конкурирующих эффектов обтекания и отрывов потока. Однако изменение угла в периферийном сечении (мод. 9\_Н) критично для тяги: отклонения приводят к ее изменению на  $\pm 1,54\%$  (11185-11535 Н при

номинале 11360 Н). Это подтверждает необходимость жесткого контроля угла установки, особенно в периферийных зонах, для обеспечения стабильности параметров двигателя

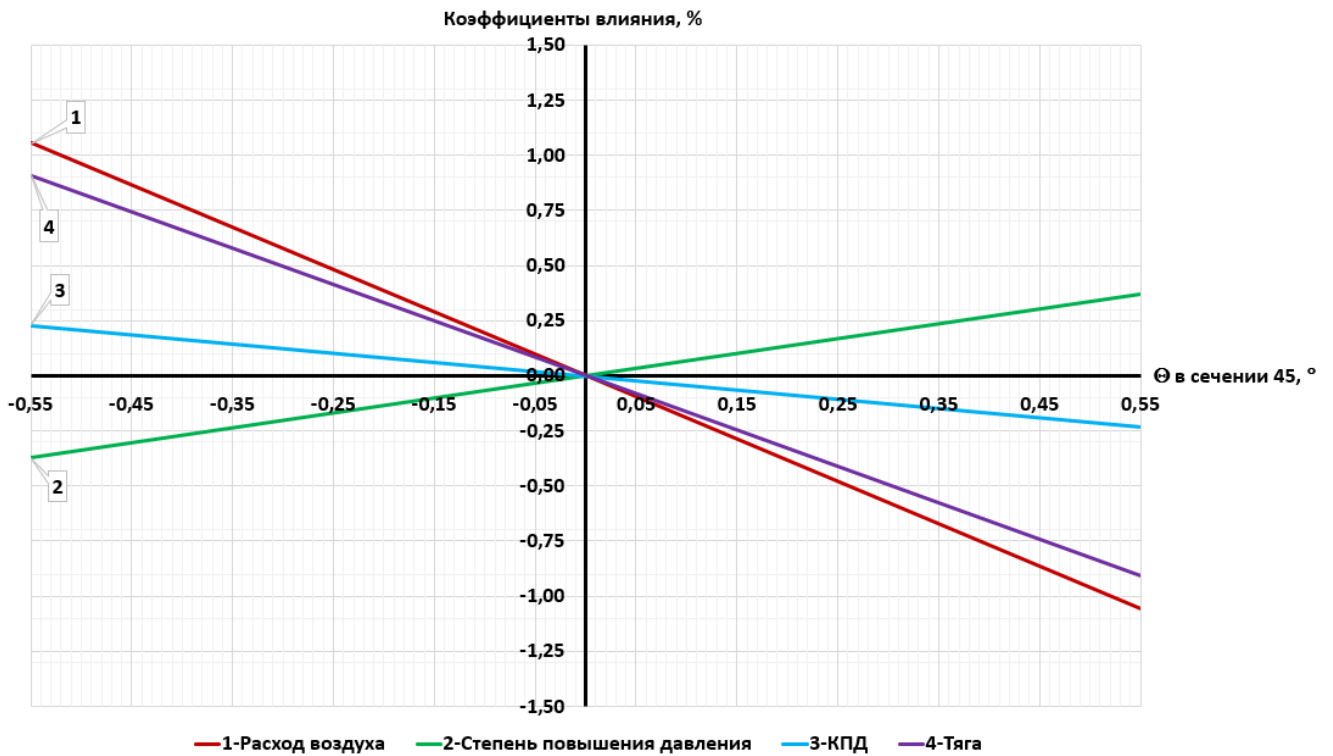


Рисунок 5.13 – График зависимости для моделей 7\_H\_min и 7\_H\_max

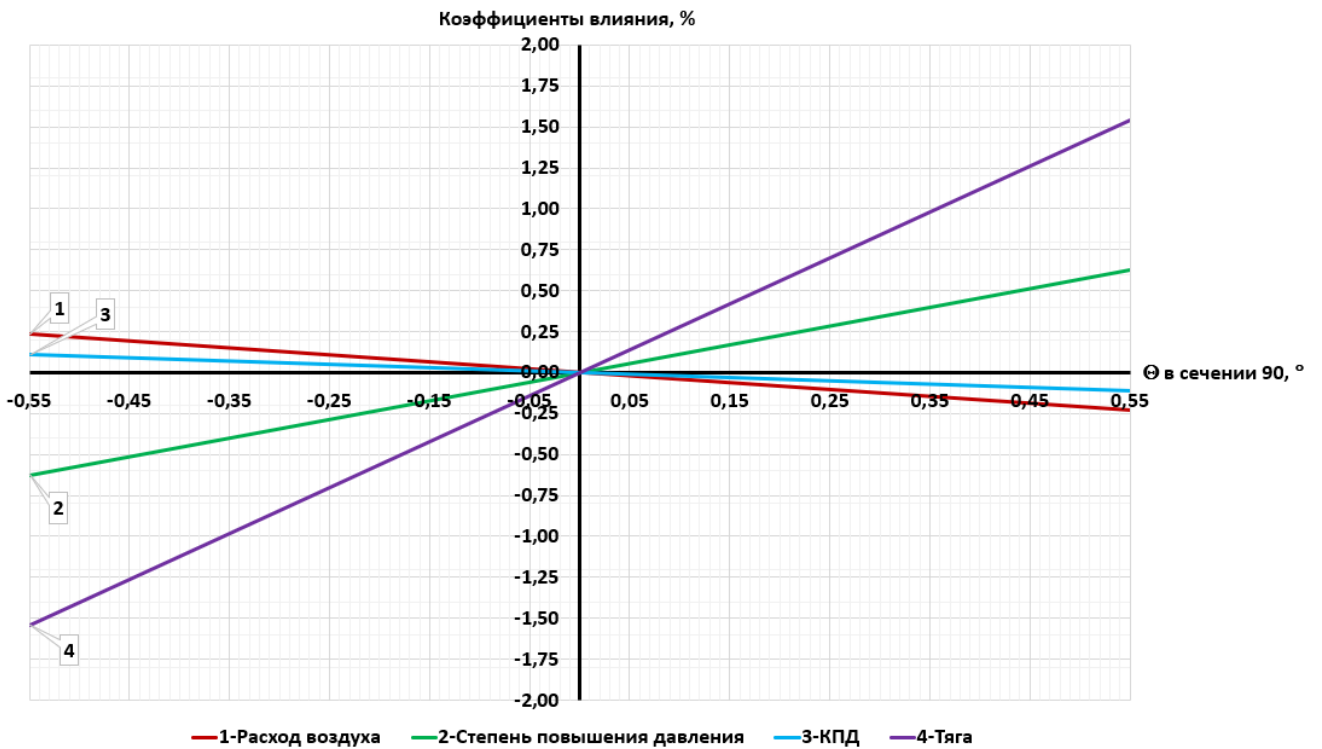


Рисунок 5.14 – График зависимости для моделей 9\_H\_min и 9\_H\_max

Построение таких зависимостей позволяет визуализировать характер отклика системы, оценить степень линейности или нелинейности влияния отдельных параметров и выявить потенциально критичные зоны в пространстве допусков. Сравнительный анализ результатов, полученных при положительных и отрицательных отклонениях от номинальной геометрии, обеспечивает более полное понимание поведения конструкции в условиях технологической дисперсии и способствует разработке критериев оптимизации, ориентированных на обеспечение высокой эффективности и стабильности эксплуатационных характеристик в условиях серийного производства.

В ходе анализа зависимостей между варьируемыми геометрическими параметрами рабочей лопасти вентилятора и ее аэродинамическими характеристиками установлено, что отклик системы по ключевым интегральным показателям – расходу, степени повышения давления, КПД и тяге с достаточной степенью точности может быть аппроксимирован линейной зависимостью для всех рассматриваемых переменных. К ним относятся: смещение центра тяжести сечения в радиальном ( $T_x$ ) (модели: 1\_Н, 2\_Н, 3\_Н) и окружном ( $T_y$ ) (модели: 4\_Н, 5\_Н, 6\_Н) направлениях, угол установки профиля ( $\Theta$ ) (модели: 7\_Н, 8\_Н, 9\_Н), толщина профиля у входной ( $e1$ ) (модели: 13\_Н, 14\_Н, 15\_Н) и выходной ( $e2$ ) (модели: 16\_Н, 17\_Н, 18\_Н) кромок, а также максимальная толщина профиля ( $E$ ) (модели: 10\_Н, 11\_Н, 12\_Н).

Высокая степень линейности отклика обусловлена умеренными величинами геометрических отклонений, соответствующих пределам технологических допусков, при которых аэродинамические характеристики изменяются в пределах, допускающих локальную линеаризацию. Это позволяет сформировать матрицу чувствительности, устанавливающую количественные связи между геометрическими параметрами и аэродинамическими показателями эффективности.

Для указанных переменных возможно построение линеаризованных моделей отклика, пригодных для оперативной оценки и прогнозирования изменений аэродинамической эффективности вентиляторной ступени в условиях технологической дисперсии. Такие модели обеспечивают значительное сокращение вычислительных затрат по сравнению с полномасштабным численным моделированием и могут быть интегрированы в процедуры многодисциплинарной оптимизации.

#### **5.4 Аэродинамический расчет рабочих лопаток вентилятора «горячей» формы с комбинированными геометрическими отклонениями**

Основной объем исследований в данной работе посвящен анализу чувствительности аэродинамических характеристик к единичным геометрическим отклонениям профиля. Однако такой подход, позволяющий выявить степень влияния отдельных параметров, не в полной мере отражает реальную картину производственного разброса, где технологические погрешности носят стохастический характер и проявляются одновременно по нескольким геометрическим признакам.

В связи с этим, для повышения достоверности верификации результатов и оценки запаса работоспособности конструкции, был проведен дополнительный этап расчетов комплекта лопаток с комбинированными геометрическими отклонениями. Необходимость данного этапа обусловлена тем, что изолированное рассмотрение параметров не позволяет учесть эффект суперпозиции погрешностей. Комбинированные отклонения, формирующие экстремальные конфигурации геометрии, могут приводить к нелинейному ухудшению газодинамических параметров, что критически важно учитывать при оценке надежности модернизируемой ступени в условиях реального производства.

Исследуемые геометрии формировались путем комбинации предельных отклонений тех параметров профиля, которые ранее были идентифицированы как наиболее значимые для аэродинамики вентиляторной ступени. Такой подход позволяет смоделировать критические случаи изменения геометрической формы, характеризующиеся существенным влиянием на газодинамические параметры.

Для реализации поставленной задачи были созданы четыре параметризованные 3D-модели рабочей лопатки в «горячем» состоянии. Состав варьируемых параметров, методика их комбинирования и диапазоны изменения приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Перечень исследуемых параметрических 3D-моделей лопаток вентилятора с комбинированными геометрическими отклонениями

Имя лопатки	Номер сечения	Изменяемый параметр			Примечание
		Е, е1, е2	Тх, Ту	Θ	
1	04	-0,175	-0,6	-0,55°	Все отклонения в минимальную сторону
	06		-0,4		
	08		-0,4		
	10		-0,4		
	15		-0,45		
	20		-0,5		
	25		-0,55		
	30		-0,6		
	35		-0,5		
	40		-0,45		
	45		-0,4		
	50		-0,3		
	55		-0,2		
	60		-0,1		
	65		0		
	70		-0,25		
	75		-0,5		
	80		-0,725		
	85		-0,95		
90	-1				
95	-1				
2	04	+0,175	+0,6	+0,55°	Все отклонения в максимальную сторону
	06		+0,4		
	08		+0,4		
	10		+0,4		
	15		+0,45		
	20		+0,5		
	25		+0,55		
	30		+0,6		
	35		+0,5		
	40		+0,45		
	45		+0,4		
	50		+0,3		
	55		+0,2		
	60		+0,1		
	65		0		
	70		+0,25		
	75		+0,5		
	80		+0,725		
	85		+0,95		
90	+1				
95	+1				

Продолжение таблицы 5.9

Имя лопатки	Номер сечения	Изменяемый параметр			Примечание
		Е, e1, e2	Тх, Ту	Θ	
3	04	+0,175	+0,6	+0,55°	<p>Для сечений 04-25 отклонения параметров Е, e1, e2, Тх, Ту принимаются в максимальную сторону, а для сечений 30-95 – в минимальную.</p> <p>Отклонение Θ для всех сечений принимается максимальным</p>
	06		+0,4		
	08		+0,4		
	10		+0,4		
	15		+0,45		
	20		+0,5		
	25		+0,55		
	30	-0,175	-0,6		
	35		-0,5		
	40		-0,45		
	45		-0,4		
	50		-0,3		
	55		-0,2		
	60		-0,1		
	65		0		
	70		-0,25		
	75		-0,5		
	80		-0,725		
	85		-0,95		
	90		-1		
95	-1				
4	04	+0,175	+0,6	+0,55°	<p>Для сечений 04-25 отклонения всех параметров принимаются в максимальную сторону.</p> <p>Для сечений 30-95 отклонения параметров Е, e1, e2, Θ – в минимальную сторону, отклонения Тх, Ту – в максимальную</p>
	06		+0,4		
	08		+0,4		
	10		+0,4		
	15		+0,45		
	20		+0,5		
	25		+0,55		
	30	-0,175	+0,6	-0,55°	
	35		+0,5		
	40		+0,45		
	45		+0,4		
	50		+0,3		
	55		+0,2		
	60		+0,1		
	65		0		
	70		+0,25		
	75		+0,5		
	80		+0,725		
	85		+0,95		
	90		+1		
95	+1				

#### **5.4.1 Описание расчетной модели**

Базовая структура расчетной модели лопатки вентилятора в «горячем» состоянии, включая топологию проточной части и граничные поверхности, сохранена идентичной модели, подробно описанной в разделе 5.2.1. Ключевое отличие текущего этапа исследования заключается в модификации геометрии пера лопатки.

Для каждого расчетного случая формировалась индивидуальная геометрия, что позволило количественно оценить влияние некоторых комбинаций отклонений профиля на интегральные и локальные аэродинамические характеристики вентиляторной ступени. Такой подход обеспечивает достоверность сравнительного анализа, поскольку вариации в результатах обусловлены исключительно изменением геометрии, при неизменности численной схемы и граничных условий.

#### **5.4.2 Описание конечно-элементной сетки расчетной модели**

Генерация конечно-элементных сеток для расчетных моделей лопаток с комбинированными предельными геометрическими отклонениями осуществлялась в строгом соответствии с методикой, изложенной в разделе 5.2.2. Сохранение единого подхода к дискретизации расчетной области, включая типы используемых элементов, алгоритмы сгущения сетки в зонах высоких градиентов и параметры разрешения пограничного слоя, является необходимым условием для обеспечения корректности сравнительного анализа.

Идентичность топологии и качественных характеристик сеток для всех вариаций геометрии позволяет изолировать влияние комбинированных отклонений профиля на аэродинамические характеристики, исключая погрешности, связанные с различием численной аппроксимации.

#### **5.4.3 Описание граничных условий модели**

Процедура задания граничных условий, настройки параметров решателя и проведения численного эксперимента для моделей с комбинированными геометрическими отклонениями полностью соответствует методике, изложенной в разделе 5.2.3. Такое единообразие подходов обусловлено тем, что характер течения и физические режимы работы вентиляторной ступени остаются неизменными, несмотря на вариацию геометрии пера лопатки. Использование ранее верифицированной численной схемы гарантирует сопоставимость полученных результатов с данными для единичных отклонений и минимизирует влияние методических погрешностей на итоговые выводы.

#### 5.4.4 Результаты аэродинамических расчетов

Результаты численного моделирования четырех вариантов лопатки вентилятора в «горячем» состоянии с комбинированными предельными геометрическими отклонениями представлены в таблице 5.10. Максимальные значения (по сравнению с номинальной моделью) выделены красным цветом, минимальные – синим, что обеспечивает наглядную визуализацию влияния геометрических отклонений на выходные характеристики.

Таблица 5.10 – Результаты аэродинамических расчетов комплекта «горячих» моделей рабочей лопатки вентилятора

Имя модели	Расход воздуха, Гв [кг/с]	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, Р [Н]
0 (номинал)	222,28	1,7214	0,9159	11360
1	223,57	1,7394	0,9150	11728,43
2	221,18	1,7354	0,9116	11436,82
3	223,30	1,7363	0,9157	11647,78
4	223,81	1,7390	0,9162	11716,38

Комбинированные предельные отклонения геометрии профиля не приводят к деградации основных рабочих параметров вентилятора. Во всех рассмотренных случаях наблюдается некоторое увеличение тяги ( $P$ ) и степени повышения давления ( $\pi_k^*$ ) по сравнению с номинальной геометрией.

Наибольший прирост тяги (+3,24%) и расхода воздуха зафиксирован для модели 1, что свидетельствует о том, что данная комбинация отклонений способствует увеличению пропускной способности ступени. Модель 2, характеризующаяся минимальным расходом воздуха среди исследуемых вариантов, демонстрирует наименьший прирост тяги (+0,67%) и наибольшее снижение КПД (на 0,47%), однако эти изменения не являются критическими.

Коэффициент полезного действия ( $\eta_k^*$ ) остается практически неизменным, колеблясь в узком диапазоне 0,9116-0,9162. Это указывает на то, что выбранные комбинации производственных допусков не вызывают значительного роста профильных или вторичных потерь.

Полученные данные послужили основой для проведения анализа чувствительности аэродинамических характеристик вентиляторной ступени к комбинированным предельным геометрическим отклонениям.

#### 5.4.5 Анализ чувствительности аэродинамических показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора к комбинированным геометрическим отклонениям

В данном подразделе представлены результаты количественной оценки влияния комбинированных геометрических отклонений профиля на эффективность работы рабочей лопатки вентилятора. Расчеты выполнены в соответствии с методикой, описанной в разделе 5.3.

Результаты исследования систематизированы в таблице 5.11, где приведены коэффициенты чувствительности ключевых газодинамических параметров ступени. Данные коэффициенты характеризуют степень изменения выходных характеристик при реализации предельных сочетаний варьируемых геометрических переменных, позволяя выявить наиболее критичные комбинации производственных допусков. Максимальные значения (по сравнению с номинальной моделью) выделены красным цветом, минимальные – синим, что обеспечивает наглядную визуализацию влияния геометрических отклонений на выходные характеристики.

Таблица 5.11 – Коэффициенты влияния комбинированных геометрических переменных на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Имя модели	Расход воздуха, $G_v$	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, $P$
1	0,58	1,05	-0,10	3,24
2	-0,49	0,81	-0,47	0,67
3	0,46	0,87	-0,02	2,53
4	0,69	1,02	0,03	3,13

Наиболее существенной реакцией на комбинированные отклонения является изменение тяги ( $P$ ), 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.

Изменения расхода воздуха ( $G_v$ ) и степени повышения давления ( $\pi_k^*$ ) 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, что позволяет идентифицировать данную комбинацию отклонений как наиболее неблагоприятную с точки зрения энергетической эффективности, хотя и не критичную для работоспособности.

Коэффициент полезного действия ( $\eta_k^*$ ) демонстрирует высокую стабильность. Максимальное относительное отклонение составляет всего -0,47% (для Модели 2). Столь незначительные колебания КПД подтверждают, что выбранные геометрические параметры профиля обладают низкой чувствительностью к комбинированным производственным погрешностям в части гидравлических потерь.

## **5.5 Аэродинамический расчет рабочих лопаток вентилятора «горячей» формы с комбинированными геометрическими отклонениями в двухканальной постановке**

В данном разделе представлены результаты численного моделирования аэродинамики двухканальных сегментов проточной части вентилятора, включающих пару смежных рабочих лопаток. Геометрия расчетных моделей формировалась на основе комбинаций предельных отклонений профиля, ранее идентифицированных как наиболее критичные для аэродинамических характеристик ступени.

Обоснование перехода к двухканальной постановке задачи обусловлено необходимостью учета эффектов межлопаточного взаимодействия в условиях нарушенной периодичности геометрии. Использование модели, содержащей две лопатки с различными (или специфически скомбинированными) геометрическими отклонениями, позволяет учесть влияние геометрической неоднородности соседних лопаток на структуру вторичных течений и зон отрыва в межлопаточном канале.

Таким образом, цель данного этапа исследования заключается в уточнении влияния комбинированных предельных геометрических отклонений на интегральные и локальные аэродинамические характеристики рабочей лопатки вентилятора с учетом реальных условий обтекания в неоднородном венце.

### **5.5.1 Описание расчетной модели**

Для проведения численного эксперимента были сформированы три варианта параметризованных 3D-моделей рабочих лопаток вентилятора в «горячем» состоянии. Модели учитывают комбинированные предельные геометрические отклонения, идентифицированные на предыдущем этапе исследования.

Рассматривались следующие расчетные случаи (сценарии):

1. Базовый случай (Номинал): Двухканальный сегмент, состоящий из двух идентичных лопаток с идеальной номинальной геометрией. Данный случай служит эталоном для оценки влияния отклонений.

2. Случай максимального проходного сечения: Комбинация двух лопаток, соответствующих моделям 3 и 4 (см. Таблица 5.9, раздел 5.4). Данная конфигурация была выбрана на основе результатов одноканальных расчетов как обеспечивающая наибольшую эффективную площадь проточной части.

3. Случай минимального проходного сечения: Комбинация лопаток, соответствующих моделям 4 и 3 (см. Таблица 5.9, раздел 5.4), расположенных в порядке, обратном предыдущему

случаю. Эта конфигурация формирует наименьшую площадь проходного сечения среди исследуемых вариантов, моделируя условия наибольшего геометрического «запирания» потока.

Расчетная аэродинамическая область представлена на рисунке 5.15.

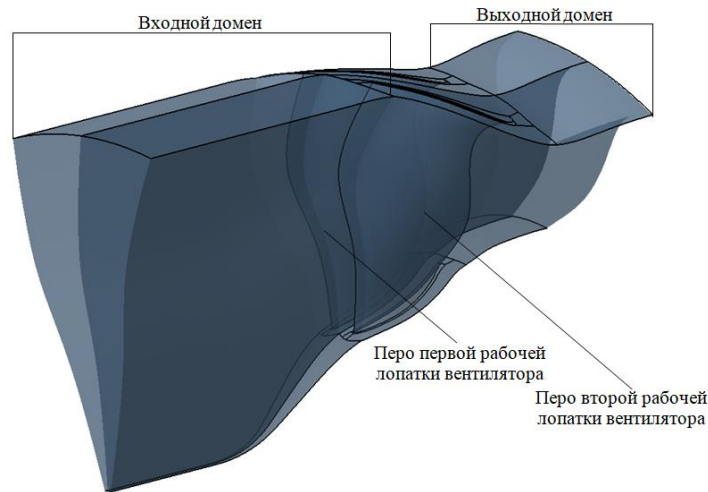


Рисунок 5.15 – Геометрическая модель двухканальной расчетной области рабочей лопатки вентилятора

Для корректного учета трехмерных эффектов течения расчетная область была расширена до сектора, включающего два межлопаточных канала. Влияние остальной части венца моделируется посредством задания периодических граничных условий на боковых стенках данного двухканального сегмента. Такой подход позволяет адекватно воспроизвести циркуляцию потока в полной окружности проточной части, обеспечивая баланс между точностью моделирования локальных взаимодействий и вычислительной эффективностью.

Для обеспечения чистоты численного эксперимента и сопоставимости результатов серии расчетов геометрические параметры неподвижных элементов проточной части (обводы корпуса и втулки, плоскости входа и выхода) оставались неизменными для всех вариантов. Варьированию подвергалась исключительно геометрия перьев рабочих лопаток в пределах исследуемого сектора.

### 5.5.2 Описание конечно-элементной сетки расчетной модели

Построение конечно-элементных сеток для двухканальных моделей лопаток «горячей» формы с комбинированными предельными отклонениями осуществлялось в модуле AutoGrid5 программного комплекса NUMECA. Процесс генерации сетки выполнялся в строгом соответствии с методикой, изложенной в разделе 5.2.2.

Итоговая расчетная сетка содержала 2,2 млн ячеек. Визуализация сетки, использованной для анализа аэродинамических характеристик, представлена на рисунках 5.16 и 5.17.

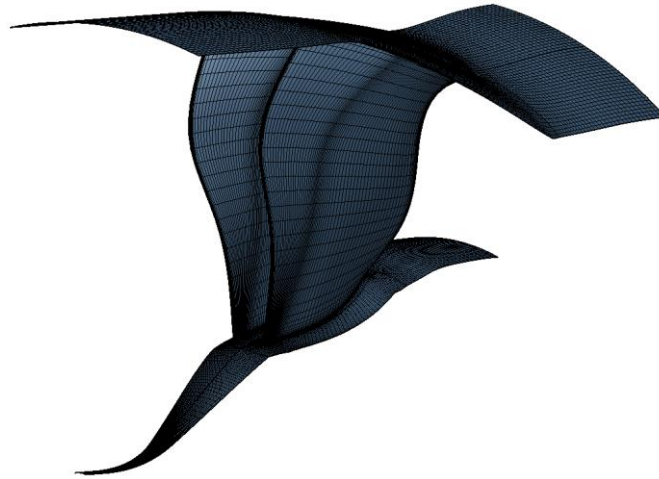


Рисунок 5.16 – Общий вид конечно-элементной сетки для аэродинамических расчетов

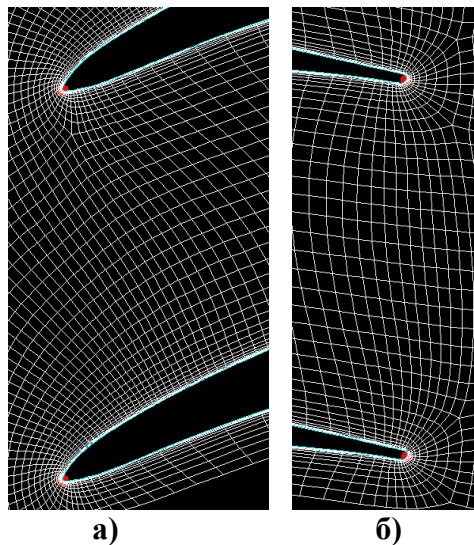


Рисунок 5.17 – Сетка конечных элементов вблизи входной (а) и выходной (б) кромок

### 5.5.3 Описание граничных условий

Процедура задания граничных условий, настройки параметров решателя и проведения численного эксперимента для двухканальных моделей с комбинированными геометрическими отклонениями полностью соответствует методике, изложенной в разделе 5.2.3.

Единообразие вычислительного подхода обусловлено тем, что фундаментальные физические особенности течения и режимы работы вентиляторной ступени сохраняются неизменными, несмотря на усложнение геометрии за счет учета смежных каналов и вариации профилей лопаток. Использование ранее верифицированной численной схемы обеспечивает прямую сопоставимость результатов двухканальных расчетов с данными, полученными для моделей с единичными отклонениями. Это позволяет изолировать влияние геометрической неоднородности на аэродинамические характеристики и минимизировать вклад методических погрешностей в итоговый анализ.

### 5.5.4 Результаты аэродинамических расчетов

Результаты численного моделирования аэродинамики двухканальных сегментов вентилятора в «горячем» состоянии, учитывающих комбинированные предельные геометрические отклонения, систематизированы в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Результаты аэродинамических расчетов комплекта «горячих» моделей рабочей лопатки вентилятора в двухканальной постановке

Комбинация	Массовый расход воздуха, $G_v$ [кг/с]	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, $P$ [Н]
Номинал – Номинал	222,28	1,7214	0,9159	11360
Модель 3 – Модель 4	223,30	1,7363	0,9157	11647,78
Модель 4 – Модель 3	221,89	1,7148	0,9095	11315,54

Исследованные комбинации геометрических отклонений приводят к разнонаправленному изменению характеристик ступени. Комбинация «Модель 3 – Модель 4» характеризуется ростом массового расхода (+0,46%) и степени повышения давления (+0,87%), что обеспечивает прирост тяги на 2,53% при практически неизменном КПД. Напротив, комбинация «Модель 4 – Модель 3» приводит к снижению расхода и давления, сопровождающемуся падением КПД на 0,7% и снижением тяги на 0,39%.

Полученные данные демонстрируют, что комбинированные геометрические отклонения в пределах установленных технологических допусков могут оказать существенное влияние на параметры вентилятора. Более того, статистическое распределение таких отклонений в реальном венце может приводить как к локальному улучшению характеристик (за счет роста пропускной способности), так и к их ухудшению.

### 5.5.5 Анализ чувствительности аэродинамических показателей эффективности рабочей лопатки вентилятора к комбинированным геометрическим отклонениям

Методология оценки влияния комбинированных геометрических отклонений на аэродинамические показатели рабочей лопатки вентилятора базируется на подходах, изложенных в разделе 5.3. Ключевой особенностью данного этапа является применение двухканальной постановки задачи, которая позволяет учесть эффекты межлопаточного взаимодействия в условиях нарушенной геометрической периодичности.

В таблице 5.12 приведены коэффициенты влияния 2-х комбинаций геометрических переменных на основные аэродинамические характеристики двухканальной вентиляторной ступени.

Таблица 5.12 – Коэффициенты влияния варьируемых геометрических переменных на аэродинамические характеристики (в % от номинала)

Комбинация	Массовый расход воздуха, $G_v$	Степень повышения давления, $\pi_k^*$	Коэффициент полезного действия, $\eta_k^*$	Тяга, $P$
Модель 3 – Модель 4	0,46	0,86	-0,02	2,53
Модель 4 – Модель 3	-0,17	-0,38	-0,70	-0,39

Наибольшую чувствительность демонстрирует тяга ( $P$ ). Разброс значений составляет от – 0,39% (для комбинации «4-3») до +2,53% (для комбинации «3-4»). Примечательно, что комбинация «Модель 3 – Модель 4» приводит к существенному росту тяги, тогда как обратная последовательность лопаток вызывает ее снижение относительно номинала.

Коэффициент полезного действия ( $\eta_k^*$ ) характеризуется наименьшей чувствительностью к исследуемым комбинациям отклонений. Максимальное зафиксированное снижение КПД составляет 0,70% (комбинация «4-3»), в то время как для комбинации «3-4» падение эффективности пренебрежимо мало (0,02%). Это свидетельствует о том, что выбранные геометрические возмущения не приводят к критическому росту профильных или вторичных потерь.

Изменения массового расхода ( $G_v$ ) и степени повышения давления ( $\pi_k^*$ ) носят согласованный характер. Комбинация, обеспечивающая рост расхода (+0,46%), также демонстрирует увеличение степени повышения давления (+0,86%). И наоборот, сочетание, приводящее к снижению расхода (-0,17%), характеризуется падением напора (-0,38%).

Использование двухканальной модели, в отличие от классической одноканальной с идеализированными периодическими граничными условиями, позволяет корректно оценить влияние геометрии лопаток с разными отклонениями. Выявленные отличия характеристик между комбинациями «3-4» и «4-3» подтверждает наличие значимых эффектов межлопаточного взаимодействия. Традиционный одноканальный подход усреднил бы эти эффекты, скрыв локальные пики нагрузок и вариации эффективности, связанные с конкретным порядком установки лопаток в венце. Таким образом, примененный метод обеспечивает необходимый баланс между точностью учета реальной геометрии проточной части и затратами вычислительных ресурсов.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Выполнено трехмерное стационарное моделирование течения в проточной части компрессора низкого давления (вентилятор + бустер) с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Построена блочно-структурированная сетка общим объемом около 2,37 млн элементов. Проведен расчет напорных характеристик на трех режимах работы ( $n=0,8$ ;  $n=0,95$ ;

$n=1,05$ ). Полученные интегральные характеристики (степень повышения давления, КПД, массовый расход) показали хорошее согласование с данными ПАО «ОДК-Сатурн», что подтверждает адекватность выбранной математической модели и граничных условий для последующих этапов исследования.

С целью снижения вычислительных затрат при проведении серийных расчетов для анализа чувствительности обоснован переход от полной модели компрессора к изолированной модели ступени вентилятора. Доказано, что замена внутреннего контура (бустера) эквивалентными граничными условиями позволяет сохранить точность оценки параметров вентилятора, сократив время расчета. Для учета эффектов межлопаточного взаимодействия и несимметричности потока при наличии геометрических отклонений предложено использовать двухканальную постановку задачи вместо традиционной одноканальной.

Разработана автоматизированная методика формирования параметризованных конечно-элементных моделей рабочих лопаток вентилятора в «горячем» состоянии, учитывающая деформации под действием центробежных и газодинамических нагрузок. Создана база из 37 модифицированных моделей, варьирующих ключевые геометрические параметры (толщину профиля, угол установки, положение центра тяжести) в пределах предельных технологических допусков.

На основе серии расчетов в одноканальной постановке установлены количественные связи между варьируемыми геометрическими параметрами и интегральными характеристиками ступени ( $G_v, \pi_k^*, \eta_k^*, P$ ):

- выявлена линейная или слабо нелинейная зависимость отклика системы от геометрических возмущений в пределах допусков, что позволяет использовать линеаризованные модели для экспресс-оценки;

- наибольшее влияние на массовый расход оказывает варьирование максимальной толщины профиля в периферийной зоне (до  $\pm 1,09\%$ );

- степень повышения давления наиболее чувствительна к изменению угла установки профиля в средних сечениях (до  $\pm 0,71\%$ );

- удельная тяга демонстрирует высокую чувствительность к углу установки в периферийных сечениях (до  $\pm 1,54\%$ ), что указывает на критическую важность контроля геометрии в зонах высоких скоростей;

- параметр КПД оказался наименее чувствительным к рассмотренным отклонениям (диапазон  $\pm 0,23\%$ ).

Результаты одноканального численного моделирования четырех вариантов лопатки вентилятора с комбинированными предельными геометрическими отклонениями показывает:

– изменение тяги от +0,67% до +3,24%. Расход воздуха меняется в пределах от -0,49% до +0,69%, а степень повышения давления – от 0,81% до 1,05%. Коэффициент полезного действия демонстрирует большую стабильность и меняется от -0,47% до +0,03%.

Выполнены аэродинамические расчеты двухканальных секторов для комбинаций лопаток с экстремальными геометрическими отклонениями («максимальное» и «минимальное» проходные сечения) на режиме максимального КПД ( $\eta=0,95$ ), в рамках которых:

– комбинация «Модель 3 – Модель 4» (соответствует максимальному проходному сечению) 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%);

– комбинация «Модель 4 – Модель 3» (минимальное проходное сечение), напротив, приводит к снижению расхода и давления, падению КПД на 0,70% и снижению тяги на -0,39%;

– наименьшую чувствительность проявляет коэффициент полезного действия ( $\eta_k^*$ ). Максимальное зафиксированное снижение КПД составляет -0,70% (комбинация «4-3»), тогда как в случае комбинации «3-4» падение эффективности мало (-0,02%). Это подтверждает, что выбранные геометрические возмущения не приводят к критическому росту профильных или вторичных потерь.

Применение двухканальной модели (в отличие от классической одноканальной с идеализированными периодическими граничными условиями) позволяет корректно учесть влияние геометрии лопаток с различными отклонениями. Выявленные различия характеристик между комбинациями «3-4» и «4-3» однозначно свидетельствуют о наличии значимых эффектов межлопаточного взаимодействия. Традиционный одноканальный подход, основанный на усреднении, нивелировал бы эти эффекты, скрыв локальные пики нагрузок и вариации эффективности, обусловленные конкретным порядком установки лопаток в венце.

Развитый в работе вычислительный аппарат и полученные количественные оценки чувствительности создают предпосылки для перехода от пассивного контроля допусков к адаптивным стратегиям сборки лопаточных венцов. В отличие от традиционного подхода, при котором лопатки считаются взаимозаменяемыми в пределах балансировочной группы, предлагаемая методология рассматривает газодинамическую неоднородность не как неустранимый недостаток, а как управляемый ресурс. Это позволяет целенаправленно повышать или стабилизировать выходные характеристики вентиляторной ступени за счет рационального взаимного расположения лопаток с известными геометрическими отклонениями без дополнительных производственных затрат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача повышения эксплуатационной эффективности и конструктивной надежности рабочих лопаток вентиляторных ступеней авиационных газотурбинных двигателей. 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. На основе применения координатно-измерительных машин (КИМ) COORD3 HERA NT разработана методика измерения профиля пера рабочей лопатки вентилятора. Реализован алгоритм припасовки измеренных данных к номинальной CAD-модели методом наименьших квадратов, что позволило разделить погрешности положения (смещение центра тяжести  $T_x, T_y$ , угол установки  $\Theta$ ) и погрешности формы профиля.

2. Выполнен статистический анализ производственных отклонений. На основе обработки данных КИМ для серийных партий лопаток («старая» и «новая» выборки) установлены законы распределения ключевых геометрических параметров ( $E, \Theta, e_1, e_2$ ). Выявлено, что законы распределения большинства параметров близки к нормальным, однако в зонах, близких к границам допусков, наблюдаются искажения, обусловленные технологической отбраковкой. Проведенный корреляционный анализ обосновал выбор рационального набора варьируемых параметров для параметрической модели: смещений центра тяжести ( $T_x, T_y$ ), угла установки ( $\Theta$ ), максимальной толщины ( $E$ ) и толщин у кромок ( $e_1, e_2$ ) в характерных сечениях (45%, 75%, 90% высоты).

3. Создан программно-методический комплекс для параметризации геометрии. Разработаны специализированные программные инструменты:

– «BladeToolMAI» (Siemens NX) – для автоматизированного построения параметрических 3D-моделей лопаток в «холодной» форме по данным КИМ. Программа поддерживает различные режимы реконструкции геометрии и обеспечивает высокую точность воспроизведения реального профиля.

– «FindSweepLayers» (ANSYS ACT) – для автоматического извлечения координат узлов деформированной конечно-элементной сетки после прочностного расчета и генерации сечений «горячей» геометрии. Внедрение связки этих инструментов позволило реализовать замкнутый цифровой цикл «измерение – прочностной расчет – геометрическая реконструкция», учитывающий разрыв между прочностными и газодинамическими моделями.

4. Проведен многодисциплинарный анализ чувствительности прочностных характеристик. Создана параметризованная конечно-элементная модель сектора рабочего колеса в среде ANSYS Workbench. Выполнена серия из 37 расчетов для «холодных» моделей с предельными отклонениями. Установлено, что:

- наибольшее влияние на перемещения лопатки оказывает смещение центра тяжести в периферийной зоне (до  $\pm 10,6\%$ ) и толщина выходной кромки (до  $\pm 6\%$ );
- напряжения в пере лопатки наиболее чувствительны к углу установки в средних сечениях (до  $\pm 3,35\%$ );
- напряжения в зонах концентрации (скруглениях) слабо чувствительны к вариациям геометрии (в пределах  $\pm 1,24\%$ ), что подтверждает сохранение запаса прочности;
- для параметров  $T_x, T_y$  и  $e_2$  выявлена линейная зависимость отклика, позволяющая использовать линеаризованные модели для экспресс-оценки прочности.

5. Оценено влияние геометрических отклонений на аэродинамику. Выполнено трехмерное CFD-моделирование течения в проточной части компрессора низкого давления (ANSYS CFX) и изолированной ступени вентилятора (NUMECA Fine/Turbo) с использованием «горячих» моделей лопаток:

- верификация полной модели компрессора показала достаточный уровень согласования с экспериментальными данными ПАО «ОДК-Сатурн»;
- анализ чувствительности единичных отклонений 37 моделей лопаток в одноканальной постановке выявил, что массовый расход наиболее чувствителен к максимальной толщине профиля в периферии (до  $\pm 1,09\%$ ), степень повышения давления наиболее чувствительна к углу установки в средних сечениях (до  $\pm 0,71\%$ ), а тяга – к углу установки в периферии (до  $\pm 1,54\%$ ). КПД оказался наименее чувствительным параметром ( $\pm 0,23\%$ );
- выполнена количественная оценка влияния 4-х вариантов комбинированных геометрических отклонений профиля на газодинамические характеристики рабочей лопатки вентилятора. Наиболее существенной реакцией на комбинированные отклонения является изменение тяги (P), разброс которой составляет от  $+0,67\%$  до  $+3,24\%$ , что свидетельствует о возможности деградации тяговых характеристик при неблагоприятном сочетании технологических допусков. Расход воздуха меняется в пределах от  $-0,49\%$  до  $+0,69\%$ , а степень повышения давления – от  $0,81\%$  до  $1,05\%$ . Коэффициент полезного действия демонстрирует высокую стабильность и меняется от  $-0,47\%$  до  $+0,03\%$ ;
- переход к двухканальной постановке задачи позволил учесть эффекты межлопаточного взаимодействия при комбинированных отклонениях. Установлено, что комбинации лопаток, соответствующая увеличению проходного сечения, сопровождается ростом массового расхода ( $+0,46\%$ ) и степени повышения давления ( $+0,87\%$ ), что обеспечивает прирост тяги на  $+2,53\%$  при

практически неизменном КПД (снижение 0,02%), в то же время комбинация со снижением проходного сечения, напротив, приводит к снижению расхода и давления, падению КПД на 0,70% и снижению тяги на -0,39%.

6. Обоснована возможность использования линеаризованных моделей. Показано, что в пределах технологических допусков отклик аэродинамических характеристик на геометрические возмущения может быть аппроксимирован линейными зависимостями. Это позволяет существенно сократить вычислительные затраты при проведении многовариантной оптимизации и вероятностного анализа надежности.

Развитый в работе вычислительный аппарат и полученные количественные оценки чувствительности создают предпосылки для перехода от пассивного контроля допусков к адаптивным стратегиям сборки лопаточных венцов. В отличие от традиционного подхода, при котором лопатки считаются взаимозаменяемыми в пределах балансировочной группы, предлагаемая методология рассматривает газодинамическую неоднородность не как неустранимый недостаток, а как управляемый ресурс. Это позволяет целенаправленно повышать или стабилизировать выходные характеристики вентиляторной ступени за счет рационального взаимного расположения лопаток с известными геометрическими отклонениями без дополнительных производственных затрат.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- ВНА – входной направляющий аппарат;
- ГДУ – газодинамическая устойчивость;
- ГДУ – газодинамическая устойчивость;
- ГТД – газотурбинный двигатель;
- КВД – компрессор высокого давления;
- КИМ – контрольно-измерительная машина;
- КИП – контрольно-измерительное приспособление;
- КНД – компрессор низкого давления;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- КЭ – конечные элементы;
- ЛВ – лопаточный венец;
- ЛРР – линия рабочих режимов;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;
- РК – рабочее колесо;
- РЛ – рабочая лопатка;
- СА – спрямляющий аппарат;
- ТНД – турбина низкого давления;
- ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина;
- CAD (computer-aided design) – система автоматизированного проектирования;
- CAE (computer-aided engineering) – система автоматизации инженерных расчетов;
- CAM (computer-aided manufacturing) – система автоматизированной подготовки производства;
- CFD (computational fluid dynamics) – вычислительная гидродинамика;
- RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) – наиболее распространенный метод расчета турбулентных течений в вычислительной газовой динамике;
- RMS – математический метод для определения среднего значения переменных величин.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Комплексная программа «Развитие авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года» [Электронный ресурс] – Режим доступа. <http://static.government.ru/media/files/PqzprfozEf6AY4iMiUGkmcWIraxAMbd1.pdf>.
2. **Жуковский, М.И.** Расчет потенциального обтекания несжимаемой жидкостью произвольных решеток лопаточных профилей на электронной вычислительной машине [Текст] / М.И. Жуковский, Н.И. Дураков, О.И. Новиков // Теплоэнергетика. – 1963. – №5. – С. 24-26.
3. **Калиткин, Н.Н.** [Текст] / Численные методы. – М.: Наука. – 1978. – 512с.
4. **Белоцерковский, С.М.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью [Текст] / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ // – М.: Наука. – 1978. – 352 с.
5. **Белоцерковский, С.М.** Силовые и моментные характеристики решеток тонких профилей [Текст] / С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский, Я.Е. Полонский // Промышленная аэродинамика. – М.: Оборонгиз. – 1962. – Вып. 22. – 126 с.
6. **Белоцерковский, С.М.** Математическое моделирование плоско-параллельного отрывного обтекания тел [Текст] / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ, Р.М. Федоров // – М.: Наука. – 1988. – 232 с.
7. **Белоцерковский, С.М.** Моделирование на ЭВМ отрывного обтекания вращающегося цилиндра и реверса силы Магнуса [Текст] / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Ништ, Р.М. Федоров // Инженерно-физический журнал. – 1985. – №2. – Т. 48. – С. 244-250.
8. **Белоцерковский, С.М.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью [Текст] / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ // М.: Наука. – 1978. – 352 с.
9. **Котовский, В.Н.** Применение нестандартных профилей для увеличения эффективности осевых вентиляторов [Текст] / В.Н. Котовский, Ю.Г. Московко // Компрессорная техника и пневматика. – 2010. – № 8. – С. 8-12.
10. **Колотников, М.Е.** Комплексный анализ динамического поведения лопаток компрессора на этапе проектирования / Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев, П.В. Макаров // Авиационные двигатели. – 2023. – № 3(20). – С. 49-66.
11. **Колотников, М.Е.** Численное исследование влияния конструктивных параметров на прогнозирование флаттера лопаток / Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев, П.В. Макаров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2019. – № 2. – С. 17-26.
12. **Колотников, М.Е.** Патент № 2417147 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 15/04. способ изготовления широкохордной полый лопатки компрессора газотурбинного двигателя: № 2009138411/02: заявл. 19.10.2009: опубл. 27.04.2011 / Ю.С. Елисеев, В.А. Поклад, М.Р. Орлов;

заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Московское машиностроительное производственное предприятие «САЛЮТ» (ФГУП «ММПП «САЛЮТ»).

13. **Милешин, В.И. и др.** Результаты расчетно-экспериментального исследования моделей вентиляторов / Т.Ю. Логинова, И.К. Орехов [и др.] // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2025 : Сборник тезисов, Москва, 01-03 декабря 2025 года. Том I, II, III. – Москва: Государственный научный центр Российской Федерации, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», 2025. – С. 192-194. – EDN ANNOFV.

14. **Милешин, В.И., Дружинин, Я.М. и др.** Расчетное исследование аэродинамических и акустических характеристик двухступенчатого вентилятора двигателя перспективного СПС [Текст] // Вычислительный эксперимент в акустике и аэродинамике: Сборник трудов 10-й российской конференции, Светлогорск, 16-21 сентября 2024 года. – Москва: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2024. – С. 403-404.

15. **Mileshin, V.I., Pankov, S.V. and all.** Computational and experimental studies of model fans for advanced turbofan engines [Текст] // Proceedings of the ASME Turbo Expo, Virtual, Online, 07-11 июня 2021 года. – Virtual, Online. – 2021. – P. V02AT31A034.

16. **Милешин, В.И., Коржнев, В.Н. и др.** Расчетно-экспериментальные исследования аэродинамики вентиляторов перспективных ТРДД [Текст] // Ученые записки ЦАГИ. – 2019. – Т. 50, № 3. – С. 3-18.

17. **Милешин, В.И. и др.** Проектирование трансзвукового ротора компрессора низкого давления на основе решения 3D-обратной задачи с целью обеспечения его работоспособности в широком диапазоне значений частоты вращения [Текст] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 57. – С. 70-88.

18. **Милешин, В.И., Гельмедов Ф.Ш. и др.** Методология проектирования осевого компрессора [Текст] // Теплоэнергетика. – 2002. – № 9. – С. 19-28.

19. **Комаров, А.П.** Исследование плоских компрессорных решеток [Текст] // Лопаточные машины и струйные аппараты. Сб. стат. Вып.2. Машиностроение. – 1967. – С. 67-109.

20. **Бунимович, Ф.И., Святогоров, А.А.** Обобщение результатов исследования плоских компрессорных решеток при дозвуковой скорости [Текст] // Лопаточные машины и струйные аппараты. Сб. стат. Вып.2. Машиностроение. – 1967. – С. 36-64.

21. **Брусиловский, И.В.** Аэродинамика и акустика осевых вентиляторов [Текст] // Труды ЦАГИ. – 2004. – Вып.2650. – 276 с.

22. **Гегин, Ф.Д.** Расчет оптимального угла атаки диффузорной решетки профилей [Текст] // В кн.: Промышленная аэродинамика, вып 32. М.: Машиностроение. – С. 117-122.

23. **Агульник, А.Б. и др.** Термогазодинамические расчеты и расчет характеристик авиационных ГТД: учебное пособие [Текст] // М-во образования Российской Федерации. Московский авиационный институт. Москва: Изд-во МАИ. – 2002. – 256 с.
24. **Агульник, А.Б., Ржавин, Ю.А. и др.** Теория компрессоров и турбин авиационных ГТД: учебное пособие [Текст] // Москва: Издательство «Знание-М». – 2022. – 467 с.
25. **Агульник, А.Б., Гусаров, С.А. и др.** Проектный расчет компрессоров и турбин авиационных ГТД: учебное пособие [Текст] // Москва: Издательство «Знание-М». – 2024. – 310 с.
26. **Галеркин, Ю.Б., Попов, Ю.А.** Анализ эффективности пространственных лопаточных решеток осевых компрессоров по данным продувок плоских решеток [Текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2005. – №3. – С. 33-38.
27. **Галеркин, Ю.Б., Попов, Ю.А.** Расчетный анализ характеристик осевых компрессорных ступеней [Текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2005. – №5. – С. 26-33.
28. **Галеркин, Ю.Б., Попов, Ю.А.** Оптимизация проточной части осевых компрессоров на стадии вариантного расчета. Часть 1 [Текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – №5. – С. 2-9.
29. **Галеркин, Ю.Б., Попов, Ю.А.** Оптимизация проточной части осевых компрессоров на стадии вариантного расчета. Часть 2 [Текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – №6. – С. 11-19.
30. **Галеркин, Ю.Б., Попов, Ю.А.** Оптимизация проточной части осевых компрессоров на стадии вариантного расчета. Часть 3 [Текст] // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – №7. – С. 6-12.
31. **Галеркин, Ю.Б.** Анализ эффективности элементарных решеток осевых компрессоров по данным продувок плоских решеток [Текст] / Ю.Б. Галеркин, Ю.А. Попов, А.Ю. Прокофьев // Компрессорная техника и пневматика. – 2005. – №1. – С. 13-20.
32. **Вандерплаатс, Г.Н.** Эффективный алгоритм численной оптимизации профиля [Текст] // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – № 9.
33. **Редж, П.** Экономический метод решения задачи проектирования применительно к сверхкритическим крыльям [Текст] / П. Редж, Л.Р. Миранда, А.Р. Сибасе // Аэрокосмическая техника. – 1983. – №5. – С. 21-23.
34. **Хассан.** Профили с заданным распределением давления при дозвуковом обтекании [Текст] / Хассан, Г. Собецки, А.Р. Сибасе // Аэрокосмическая техника. – 1985. – № 14.

35. **Вольп, Г., Мельник, Р.Э.** Роль ограничений в обратной задаче проектирования профилей при околосзвуковом обтекании [Текст] // *Аэрокосмическая техника*. – 1985. – №8. – С. 32-36.
36. **Вольп, Г., Мельник, Р.Э.** Метод профилирования замкнутых профилей с произвольным сверхкритическим распределением скоростей [Текст] // *Аэрокосмическая техника*. – 1987. – № 4.
37. **Московко, Ю.Г.** Использование несимметричных S-образных профилей в осевых реверсивных вентиляторах [Текст] // *Компрессорная техника и пневматика*. – 2011. – № 3. – С. 23-24.
38. **Рехтер.** Сравнение аэродинамических профилей с управляемой диффузорностью и с обычными профилями НАСА-65 для направляющих лопаток многоступенчатого осевого компрессора [Текст] / Рехтер, Штайнерт, Леман // *Энергетические машины и установки*. – 1985. – № 3.
39. **Хоббс, Вайнгольц.** Применение метода управляемой диффузорности при разработке профилей лопаток для осевых многоступенчатых компрессоров [Текст] // *Энергетические машины и установки*. – 1984. – № 2.
40. **Дункер.** Перепрофилирование направляющего аппарата трансзвуковой ступени осевого компрессора. Анализ характеристик ступени и характеристик эквивалентных плоских решеток с дозвуковыми лопатками, спрофилированными методом управляемой диффузорности [Текст] // *Энергетические машины и установки*. – 1984. – № 2.
41. **Кравец, М.Б., Савин, Н.М.** Сравнительное расчетное исследование обтекания компрессорных решеток профилей с откорректированной диффузорностью [Текст] // *Тех. Отчет. ЦИАМ, Инв. № 10685*. – 1986.
42. **Carter, A.D.** Some tests on Compressor Cascades of Related airfoils having Different Positions of Maximum Camber [Текст] // *R&M. №2694*. – 1953.
43. **Монелло.** Расчет и профилирование нестандартных лопаток для выходных спрямляющих аппаратов сильно нагруженных турбин [Текст] / Монелло, Митчелл, Толл // *Энергетические машины и установки*. – 1979. – №1. – С. 37-41.
44. **Бекнев, В.С.** Исследование компрессорных решеток с управляемой формой средней линии профиля [Текст] / В.С. Бекнев, С.Е. Василенко, М.Ю. Сорокалетов, Р.З. Тумашев, М.А. Шаровский // – *Теплоэнергетика*. – 1997. – № 4. – С. 38-42.
45. **Василенко, С.Е.** Влияние формы средней линии профилей на потери в концевых областях прямых компрессорных решеток [Текст] / С.Е. Василенко, В.В. Огнев, Р.З. Тумашев // *Изв. Вузов. Машиностроение*. – 1987. – С. 76-79.

46. **Василенко, С.Е.** Совершенствование КНД ГПА 25 применением специального профилирования последних ступеней компрессора. Судовое и энергетическое машиностроение, т.1 [Текст] / С.Е. Василенко, В.Е. Спицын, М.А. Шаровский // Николаев: НППК «Зоря» – «Машпроект». – 2004. – 157 с.

47. **Шаровский, М.А.** Расчетный и экспериментальный анализ характеристик ступеней компрессора, спроектированных методом специального профилирования [Текст] / М.А. Шаровский, А.В. Ивченко, М.Ю. Щелковский // Общие вопросы двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 26-31.

48. **Akira Goto.** Application of an inverse Cascade design Method to an Axial Fan [Текст] // JSME. Int.J. – 1987. – Vol.30. – № 267.

49. **Уислер.** Снижение потерь в осевых компрессорах на основе испытаний низкооборотных моделей [Текст] // Энергетические машины и установки. – 1985. – № 2.

50. **Сарэн, В.Э.** Задачи обтекания и коррекции формы тонких профилей в несжимаемом потоке [Текст] // Изв. РАН, МЖГ. – №1. – 1992. – С. 130-137.

51. **Сарен, В.Э. Смирнов, С.А.** Прямая и обратная задачи для решетки тонких профилей в дозвуковом потоке [Текст] // ЦИАМ НТО. – №11330. – 1989. – 51 с.

52. **Брусиловский, И.В.** Аэродинамика осевых вентиляторов [Текст] // М., Машиностроение. – 1984. – 240 с.

53. **Брусиловский, И.В.** Аэродинамический расчет осевых вентиляторов [Текст] // М.: Машиностроение. – 1986. – 288 с.

54. **Брусиловский, И.В.** Аэродинамика и акустика осевых вентиляторов [Текст] // Труды ЦАГИ. – 2004. – Вып.2650. – 276 с.

55. **Московко, Ю.Г.** Разработка и исследование аэродинамических схем реверсивных регулируемых осевых вентиляторов [Текст] // Промышленная Аэродинамика. М.: Машиностроение. – 1991. – Вып. 34. – С. 240-250.

56. **Красюк, А.М.** Исследование и разработка тоннельных вентиляторных агрегатов [Текст] // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. - Ин-т горного дела – науч.-исслед. учреждение СО РАН. Новосибирск. – 2000. – 18 с.

57. **Попов, Н.А.** Разработка реверсивных осевых вентиляторов главного проветривания шахт [Текст] // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук. - Ин-т горного дела Сиб. отд-ния Рос. акад. Наук. -Новосибирск. – 2001. – 39 с.

58. **Li Chaojun.** Optimal design of two-way axial fan and Experimental Research Chinese [Текст] / Li Chaojun, Zhao Dewen, Wei Baisuo // Journal of Mechanical Engineering. – Vol.27. – № 5. – pp. 54-60.

59. **Bogdanovich, B.** Reversible axial fan with blades created of slightly distorted panel profiles [Текст] / B. Bogdanovich, J. Bogdanovich-Jovanovich, Z. Spasich., S. Milanovich // Facta Universitatis. -Series Mechanical Engineering. – Vol.7. – № 1. – 2009. – pp. 23-36.
60. **Huang Diangui.** 3D optimum design of reversible axial flow fan with S-type blade [Текст] // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – Vol.41. – № 12. – 2005. – pp. 182-185.
61. **Zangeneh, M.A.** Compressible Three-Dimensional Design Method for Radial and Mixed Flow Turbomachinery Blades [Текст] // Int. J. Numerical Methods in Fluids. – 1991. – Vol.13, – pp. 599-624.
62. **Okamoto, H.** Design of propeller fan using 3-D inverse design method and CFD for high efficiency and low aerodynamic noise [Текст] / H. Okamoto, A. Goto, M. Furukawa // Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, August 2-6. 2009, Vail, Colorado USA.
63. **Kyoung-Yong Lee.** Design of axial fan using inverse design method [Текст] / Kyoung-Yong Lee, Young-Seok Choi, Young-Lyul Kim and Jae-Ho Yum // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2008. – 22. – pp. 1883-1888.
64. **Батяев, Е.А.** К расчету аэродинамических характеристик решетки тонких лопастей осевого вентилятора [Текст] // Теплофизика и аэромеханика. М. – 2002. – том 9. – №4. – С. 543-550.
65. **Косарев, Н.П.** Математические модели аэродинамики вращающихся круговых решеток аналитических профилей произвольной формы со струйным управлением циркуляцией [Текст] / Екатеринбург: Изд-во УГГУ. – 2005. – 93 с.
66. **Биргер, И.А., Шорр, Б.Ф.** Динамика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] // М.: Машиностроение – 1981. – 232 с.
67. **Heinze K., Vogeler K., Friedl W.H.** The Impact of Geometric Scatter on High-Cycle-Fatigue of Compressor Blades [Текст] // Proc. of the ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, June 14-18, Glasgow, UK. – 2010. – P. 591-599.
68. **Duffner J.D.** The Effects of Manufacturing Variability on Turbine Vane Performance. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. – 2008 (Tech. Rep. ACDL TR-08-1).
69. **Нихамкин М.Ш. и др.** Влияние рассеяния размеров лопаток компрессора на рассеяние собственной частоты изгибных колебаний [Текст] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 17–17.
70. **Brown J.M., Slater J.C., Grandhi R.V.** Probabilistic Analysis of Geometric Uncertainty Effects on Blade Modal Response [Текст] // Proc. of the ASME Turbo Expo, International Joint Power Generation Conference, June 16–19, Atlanta, USA. – 2003. – P. 247-255.
71. **Chi Ma et al.** Robust Optimization Design of Compressor Blade Considering Machining Error [Текст] // Proc. Of the ASME TurboExpo, June 26–30, Charlotte, USA. – 2017. – P. 1-10.

72. **Жуковский, Н.Е.** Видоизменение метода Кирхгофа для определения движения жидкости в двух измерениях при постоянной скорости, данной на линии тока [Текст] // Собрание сочинений. М.: ГТТИ. – 1949.Т.П. – С.489-626.

73. **Блох, Э.Л., Гиневский, А.С.** Безвихревое обтекание решеток кругов и его использование при расчете гидродинамических решеток [Текст] // Промаэродинамика.-М.: Из-во ЦАГИ. – 1961. – Вып. 20. – С. 89-136.

74. **Акимов, Н.К.** Автоматизация проектирования конструкций рабочих лопаток стационарных газовых турбин [Текст] / Н.К. Акимов, Р.И. Мусаев, О.А. Шварцман, Б.М. Аронов, В.В. Бибииков, И.Б. Дмитриева, В.А. Камынин, С.А. Карева, А.Г. Керженков, И.Н. Пантазьева // ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ. Сер. «Вестник СГАУ» Самара. – 1999. – С. 154-159.

75. **Аронов, Б.М.** Совершенствование процессов проектирования газодинамической доводки осевых компрессоров путем оптимизации профилирования лопаток [Текст] / Б.М. Аронов, В.Ю. Климноук, Ю.И. Климноук, Г.Н. Чурсанов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Сер. «Вестник СГАУ» Самара. – 1999. – С. 125-133.

76. **Милешин, В.И.** Проектирование трансзвукового ротора компрессора низкого давления на основе решения 3D-обратной задачи с целью обеспечения его работоспособности в широком диапазоне значений частоты вращения [Текст] / В.И. Милешин, И.К. Орехов, С.К. Щипин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 57. – С. 70-88.

77. **Егоров, И.Н.** Многокритериальная оптимизация сложных технических от проектирования до изготовления [Текст] / И.Н. Егоров, Г.В. Кретинин, И.Б. Матусов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 2. – С. 1-16.

78. **Егоров, И.Н.** Оптимизация геометрических параметров осевого компрессора [Текст] / И.Н. Егоров, Г.В. Кретинин, К.С. Федечкин // Научные технологии. – 2008. – Т. 9. № 3. – С. 46-49.

79. **Иноземцев, А.А.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 4: Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]. Т. 4. - 2008. - 191 с.: ил., цв. ил., табл.; ISBN 978-5-94275-403-7.

80. **Скибин, В.А.** Машиностроение. Энциклопедия. Самолеты и вертолеты. ТIV-21. Авиационные двигатели. Кн. 3 [Текст] / В.А. Скибин, Ю.М. Темис, В.А. Сосунов. // Москва: Машиностроение, 2010. – 720 с. – ISBN 978-5-217-03482-6. – URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/339620/reading> (дата обращения: 02.06.2026).

81. **Колотников, М.Е.** Энергетический метод расчета флаттера лопаток турбомашин: опыт использования и перспективы / Ф.А. Абдухакимов, В.В. Веденеев [и др.] // Проблемы и

перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 23–25 июня 2021 года. Том 1. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. – С. 12-13. – EDN HVPTSE.

82. **Шахов, А.С.** Методика оценки динамики и прочности деталей компрессора низкого давления газотурбинного двигателя с учетом геометрических отклонений: диссертация кандидата технических наук: 2.5.15. / Шахов Александр Сергеевич; [Место защиты: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)]; Диссовет Д 212.125.ХХ (24.2.327.06)]. - Москва, 2022. - 134 с.: ил.

83. **Ravikovich Yu.** Influence of Geometric Deviations of the Fan Blade Airfoil on Aerodynamic and Mechanical Integrity [Текст] / Yu. Ravikovich, D. Kholobtsev, A. Arkhipov, A. Shakhov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1891. – Article № 012042.

84. **Семенов А.В.** Исследование влияния разброса размеров компрессорных лопаток на газодинамические и прочностные характеристики [Текст] / А.В. Семенов, П.Г. Кожемяко // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2021. – № 3. – С. 128–132.

85. **Arkhipov A.N.** Creation of Models of Fan Blades According to Airfoil Measurements [Текст] / A. Arkhipov, Yu. Ravikovich, D. Kholobtsev // Proc. of the ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. – Sept. 21-25. – 2020. – Paper № GT2020-16039.

86. **Демин, Ф.И.** Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Текст]: учебное пособие / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев // М.: Машиностроение. – 2002. – 328 с.

87. **Иващенко, И.А.** Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов [Текст] / И.А. Иващенко // М.: Машиностроение. – 1981. – 224 с.

88. **Крымов, В.В.** Производство газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин // М.: Машиностроение - Полет, 2002. – 376 с.

89. **Лунев, А.Н.** Расчет кинематической погрешности при обработке кольцевым инструментом межлопаточного канала моноколес ГТД [Текст] / А.Н. Лунев, Л.Т. Моисеева, А.В. Стариков, Р.С. Ермаков // Известия вузов. Авиационная техника. – Казань: КНИГУ. – 2007. – №3. – С. 72-74.

90. **Лунев, А.Н.** Формообразование сложнопрофильных поверхностей полусвободным инструментом (монография) [Текст] / А.Н. Лунев, Ф.С. Юнусов, Р.Ф. Юнусов // монография. – Казань: Изд-во Казан, гос. техн. ун-та. – 2011. – 280 с.

91. **Маталин, А.** Технология машиностроения учебник. 2-е изд., и с пр. [Текст] / СПб.: Лань. – 2008. – 512 с.
92. **Скубачевский, Г.С.** Авиационные газотурбинные двигатели [учебник для студентов авиационных вузов Текст] / М.: Машиностроение. – 1969. – 544 с.
93. **Балонкина, И.И.** Точность и производственный контроль в машиностроении. Справочник [Текст] / И.И. Балонкина, А.К. Кутай, Б.М. Сорочкии, Б.А. Тайц. // Д.: Машиностроение. – 1983. – 368 с.
94. **Шманев, В.А.** Контрольно-измерительные приспособления для производства деталей авиационных двигателей учебное пособие под ред. А.П. Шулепова [Текст] / М.: Изд-во МАИ. – 1992. – 208 с.
95. **Шубников, К.В.** Унифицированные переналаживаемые средства измерения [Текст] / Д.: Машиностроение. – 1978. – 200 с.
96. **Шулепов, А.П.** Проектирование технологической оснастки [Текст] / А.П. Шулепов, В.А. Шманев, И.Л. Шитарев. // Самара: СГАУ. – 1996. – 332 с.
97. **Суслин, В.П.** Современные методы измерения и контроля в машиностроении [Текст] / В.П. Суслин, А.В. Джунковский // Технология машиностроения. – 2004. – №5. – С. 49-51.
98. **Phillips, S.** Performance evaluations [Текст] / S. Phillips, J. Bosch (Ed.) // Coordinated measuring machines and systems / Marcel Dekker inc. – New York, 1991. – Pp. 137-225.
99. **Yadong, Li.** Free-form surface inspection techniques state of the art review [Текст] / Li Yadong, Gu Peihua // Computer-Aided Design. – 2004. – №36. – Pp. 1395-1417.
100. МИ2569-99. Рекомендация государственная система обеспечения единства измерений. Машины координатно-измерительные портального типа. Методика поверки [Текст]. – Введ. 1999-27-12. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 1999. – 9 с.
101. Appendix to the Pattern Approval Certificate No. 63505: Coordinate measuring machines COORD3. Moscow: All-Russian Research Institute of Metrological Service Publ. – 2016. – 18 p.
102. ГОСТ Р ИСО 10360-2–2017. Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые для измерения линейных размеров. М., 2019, 32 с.
103. **Архипов, А.Н.** Построение 3D моделей лопаток вентилятора газотурбинного двигателя в САД-системе по данным контрольно-измерительных мероприятий [Текст] / А.Н. Архипов, Ю.А. Равикович, И.М. Федоров, Д.П. Холобцев. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 7-16.

104. **Печенин, В.А.** Модель координатных измерений геометрии поверхностей сложной формы [Текст] / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 21. – № 4. – С. 675-685.

105. **Печенин, В.А.** Сравнительное исследование алгоритмов измерения геометрии сложных профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя [Текст] / В.А. Печенин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, Е.Р. Степанова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2015. – Т. 14. – № 3-2. – С. 438-447.

106. МИ2083-90. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей [Текст]. – Введ. 1992-01-01. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 1991. – 11 с.

107. ГОСТ 8.207-7641. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 8 с.

108. **Бояров, К.В.** Разработка параметрической 3D модели рабочей лопатки компрессора [Текст] / К.В. Бояров, А.И. Рязанов, Л.А. Чемпинский. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №3 (27). – С. 182-190.

109. **Гвириц, М.А.** Разработка геометрических моделей формирования поверхностей по результатам анализа и обработки измерения деталей сложной формы: дис. канд. техн. наук: 05.01.01 / СПб., 2005. – 149 с.

110. **Рязанов, А.И.** Реализация методики создания 3D параметрических моделей типовых деталей ГТД [Текст] / А.И. Рязанов, А.В. Урлапкин, Л.А. Чемпинский. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6-4. – С. 949-954.

111. **Иванов, А.В.** Параметризация геометрических моделей [Текст] / А.В. Иванов, А.В. Гладилин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 2(24). – С. 22-29.

112. **Шишкин, В.Н.** Системообразование структурно-параметрических моделей в задачах совершенствования эксплуатационных характеристик авиационного ГТД [Текст] / В.Н. Шишкин, О.В. Виноградова // М.: Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – №4. – С. 25-29.

113. **Ермаков, А.И.** Параметрическое конечно-элементное моделирование пера лопатки ГТД средствами пакета ANSYS / А.И. Ермаков, А.Ю. Ткаченко // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. – Самара. – 2003. – С. 206-209.

114. **Архипов, А.Н.** Автоматизированное построение модели рабочей лопатки вентилятора по данным измерений профиля в САД-системе. / А.Н. Архипов, Е.В. Бугряшова,

Ю.А. Равикович, Р.А. Савин, В.В. Терентьев. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – №4. – С. 7-17.

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

116. **Архипов, А.Н.** Программа автоматизации процесса построения параметрической модели рабочей лопатки вентилятора с использованием САД-системы NX по данным КИМ / А.Н. Архипов, Ю.А. Равикович, Д.П. Холобцев, А.А. Матушкин, А.О. Шевяков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Номер свидетельства: RU 2019666141.

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

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

119. **Arkhipov, A.N.** Analysis of the impact of fan blade geometric deviations on the strength properties. / A. Arkhipov, M. Volgina, A. Matushkin, Yu. Ravikovich. // Russ. Aeron. 2019, 62(4), 535-543.

120. **Ермаков, А.И.** Параметрическое конечно-элементное моделирование пера лопатки ГТД средствами пакета ANSYS / А.И. Ермаков, А.Ю. Ткаченко // Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. – Самара – 2003. – С. 206–209.

121. NUMECA Int. «Flow Integrated Enviroment», User Manual, Numeca Int., Brussels, Belgium, 2014 [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.numeca.de/en/>.

122. **Demeulenaere, A.** Application of Multipoint Optimization to the Design of Turbomachinery Blades // Proc. of the ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, June 14-17, 2004, Vienna, Austria. P. 1481-1489.

123. **Архипов, А.Н.** Проверка функциональной зависимости между производственными отклонениями геометрии пера лопатки и показателями эффективности вентиляторной ступени [Текст] / А.Н. Архипов, Ю.А. Равикович, Д.П. Холобцев, А.О. Шевяков. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2024. – № 3. – С. 106-114.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)**

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018665345  
«Программа автоматизации процесса построения лопатки вентилятора с использованием САД-  
системы NX по данным КИМ»

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****СВИДЕТЕЛЬСТВО****о государственной регистрации программы для ЭВМ****№ 2018665345**

**Программа автоматизации процесса построения лопатки  
вентилятора с использованием САД-системы NX по  
данным КИМ**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский  
университет)» (RU)**


Авторы: **Архипов Александр Николаевич (RU), Равикович Юрий  
Александрович (RU), Матушкин Антон Алексеевич (RU),  
Холобцев Дмитрий Петрович (RU), Шевяков Артём Олегович  
(RU)**

Заявка № **2018663214**Дата поступления **22 ноября 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **04 декабря 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)**

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019666141  
«Программа автоматизации процесса построения параметрической модели рабочей лопатки  
вентилятора с использованием САД-системы NX по данным КИМ»

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****СВИДЕТЕЛЬСТВО****о государственной регистрации программы для ЭВМ****№ 2019666141**

**Программа автоматизации процесса построения  
параметрической модели рабочей лопатки вентилятора с  
использованием САД-системы NX по данным КИМ**

Правообладатели: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский  
университет)» (RU), Публичное акционерное общество  
«ОДК-Сатурн» (RU)**

Авторы: **см. на обороте**

Заявка № **2019665192**

Дата поступления **26 ноября 2019 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **05 декабря 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



## ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное)

Графические зависимости между варьируемыми геометрическими переменными и прочностными характеристиками лопатки вентилятора

Для оценки влияния производственных отклонений и создания модели экспресс-анализа построены графики чувствительности прочностных характеристик лопатки к изменению ее геометрии. На них показана зависимость коэффициентов влияния (относительных отклонений напряжений и перемещений) от вариации геометрических параметров в пределах допусков (см. Рисунки В.1-В.18).

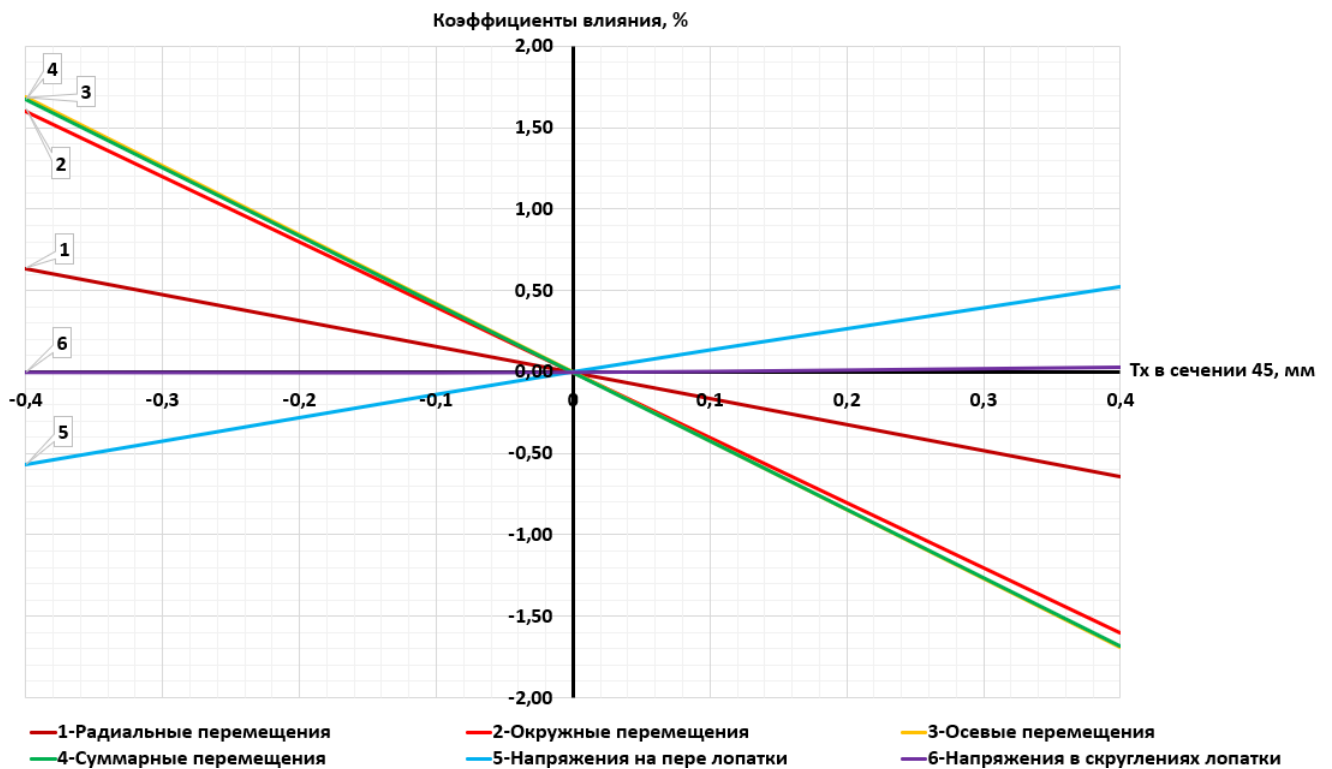


Рисунок В.1 – График зависимости для моделей 1\_C\_min и 1\_C\_max

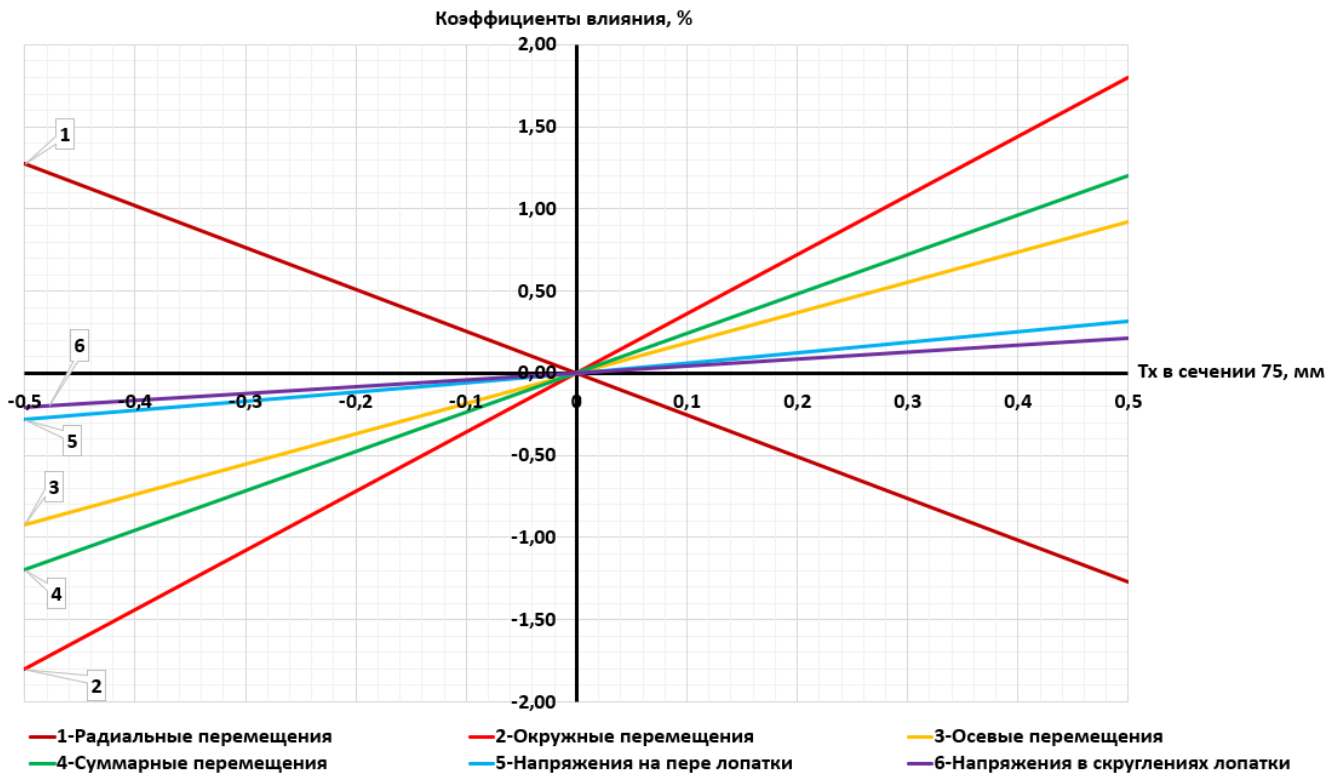


Рисунок В.2 – График зависимости для моделей 2\_C\_min и 2\_C\_max

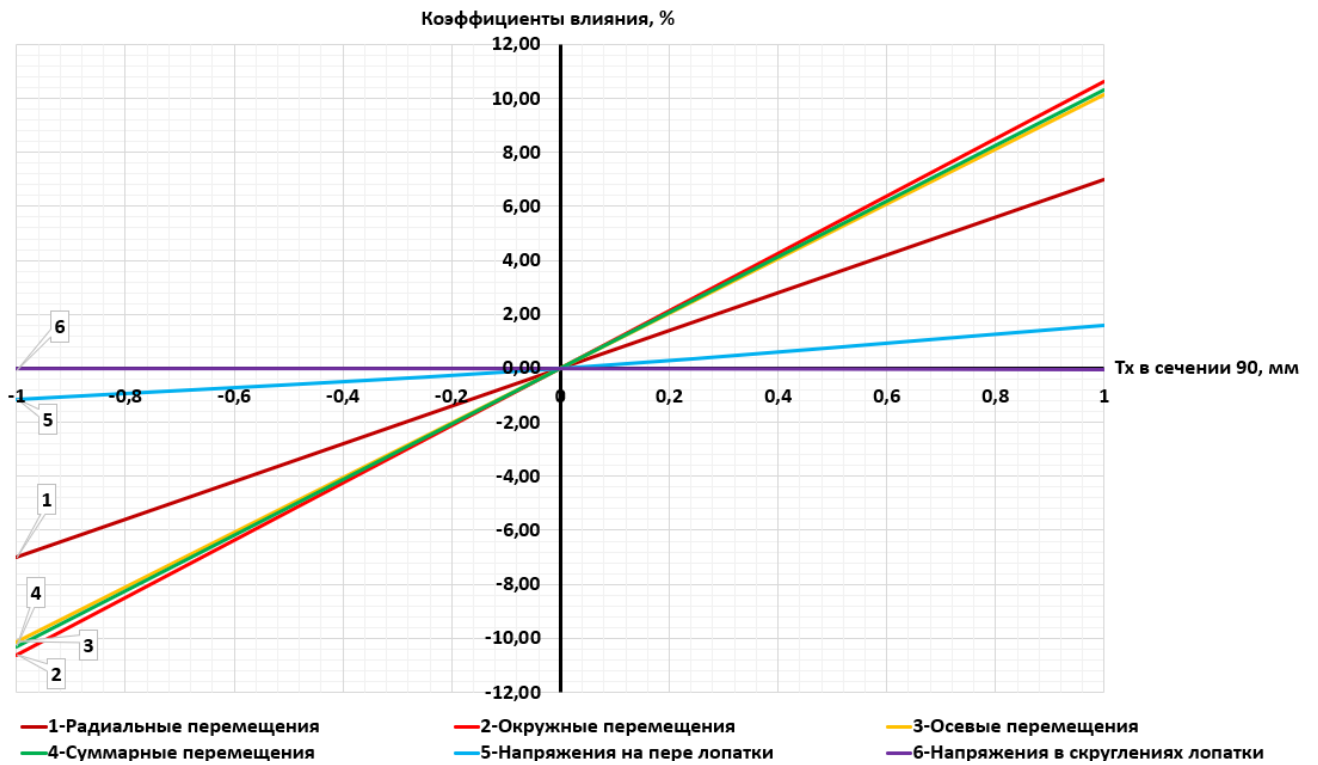


Рисунок В.3 – График зависимости для моделей 3\_C\_min и 3\_C\_max

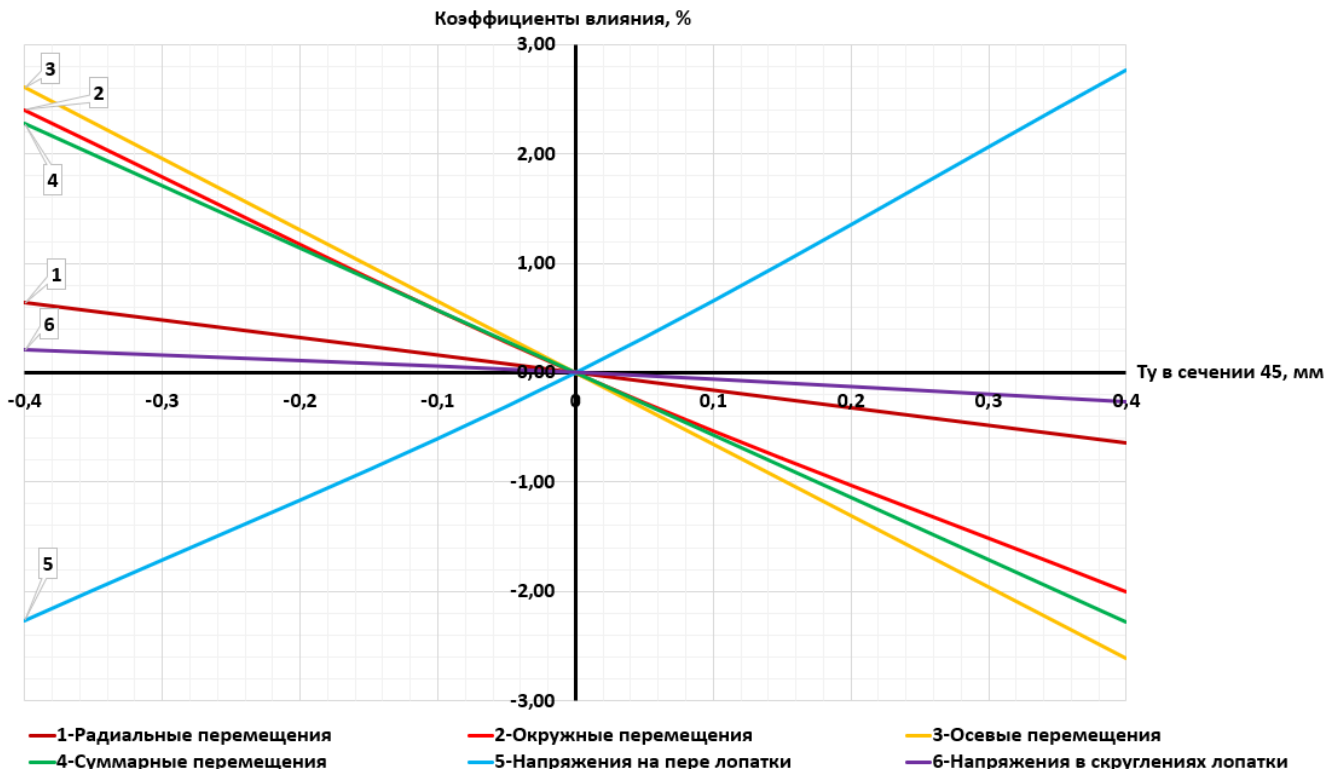


Рисунок В.4 – График зависимости для моделей 4\_C\_min и 4\_C\_max

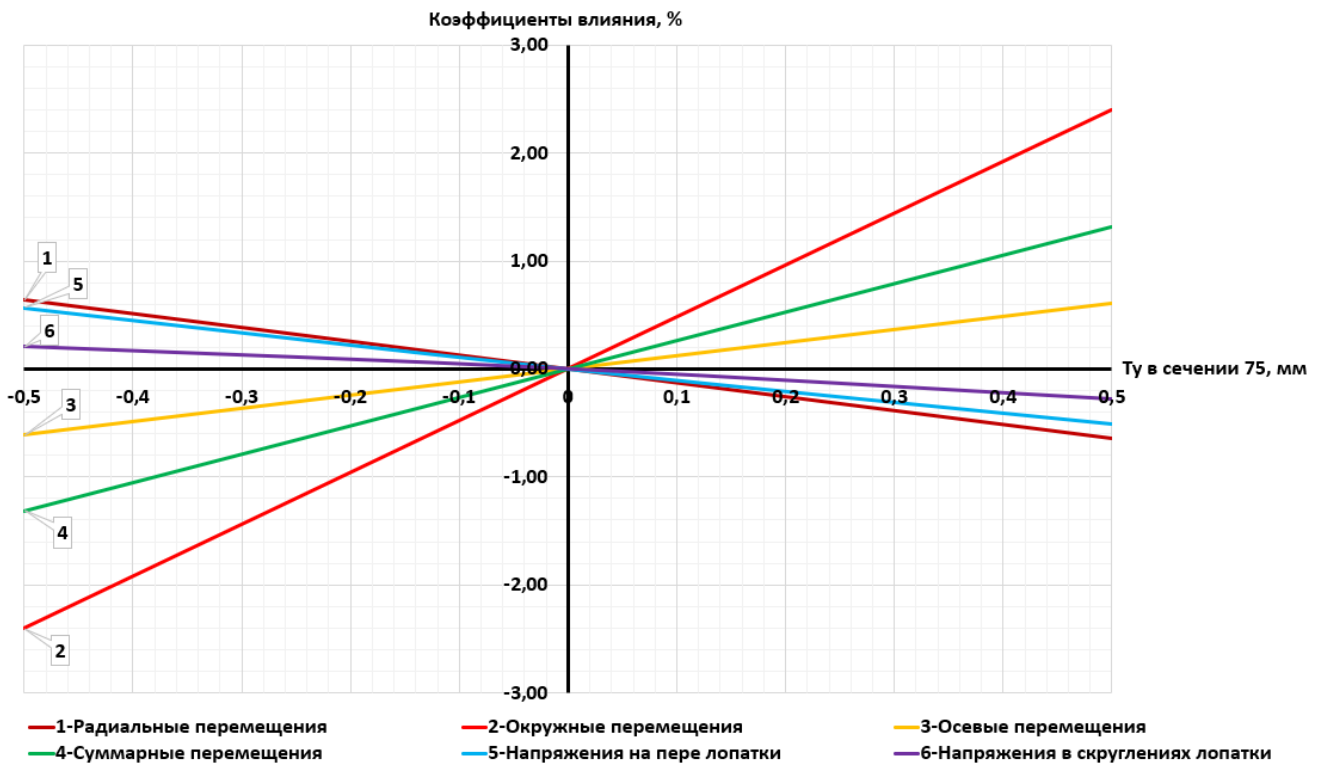


Рисунок В.5 – График зависимости для моделей 5\_C\_min и 5\_C\_max

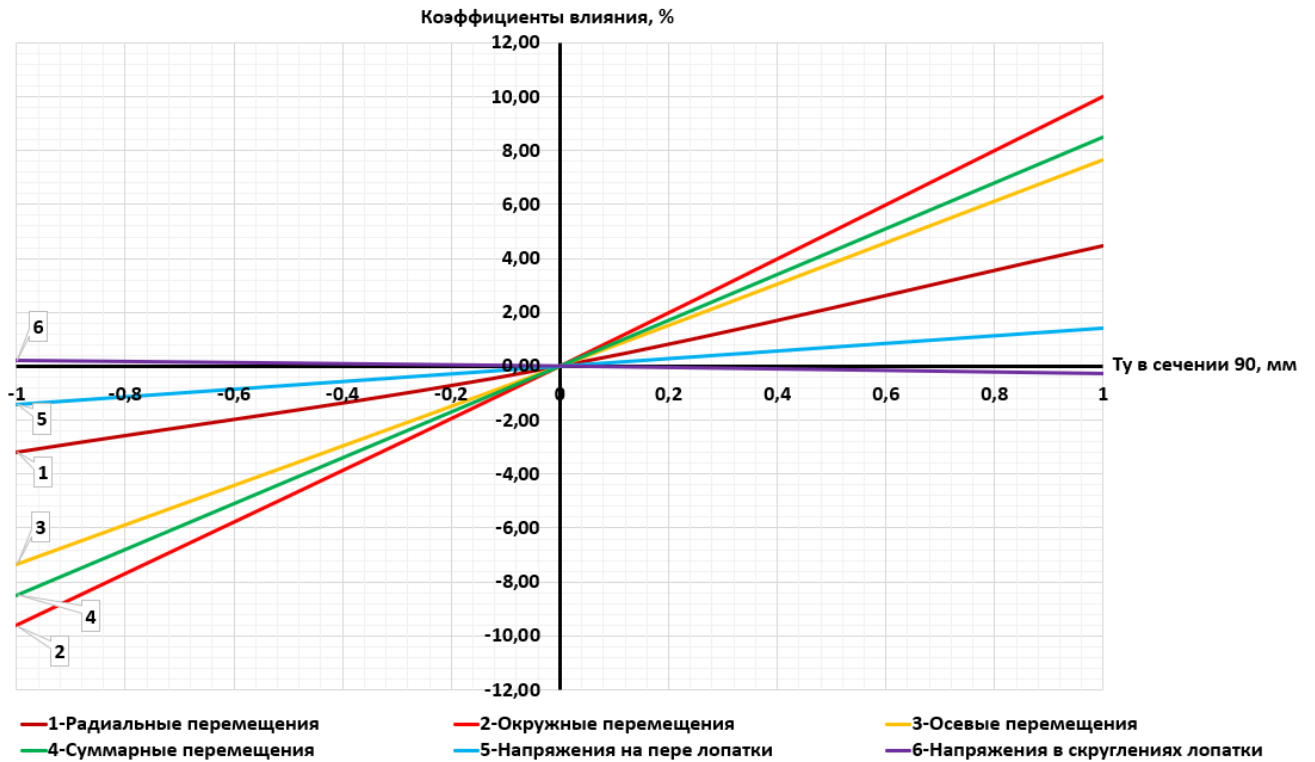


Рисунок В.6 – График зависимости для моделей 6\_C\_min и 6\_C\_max

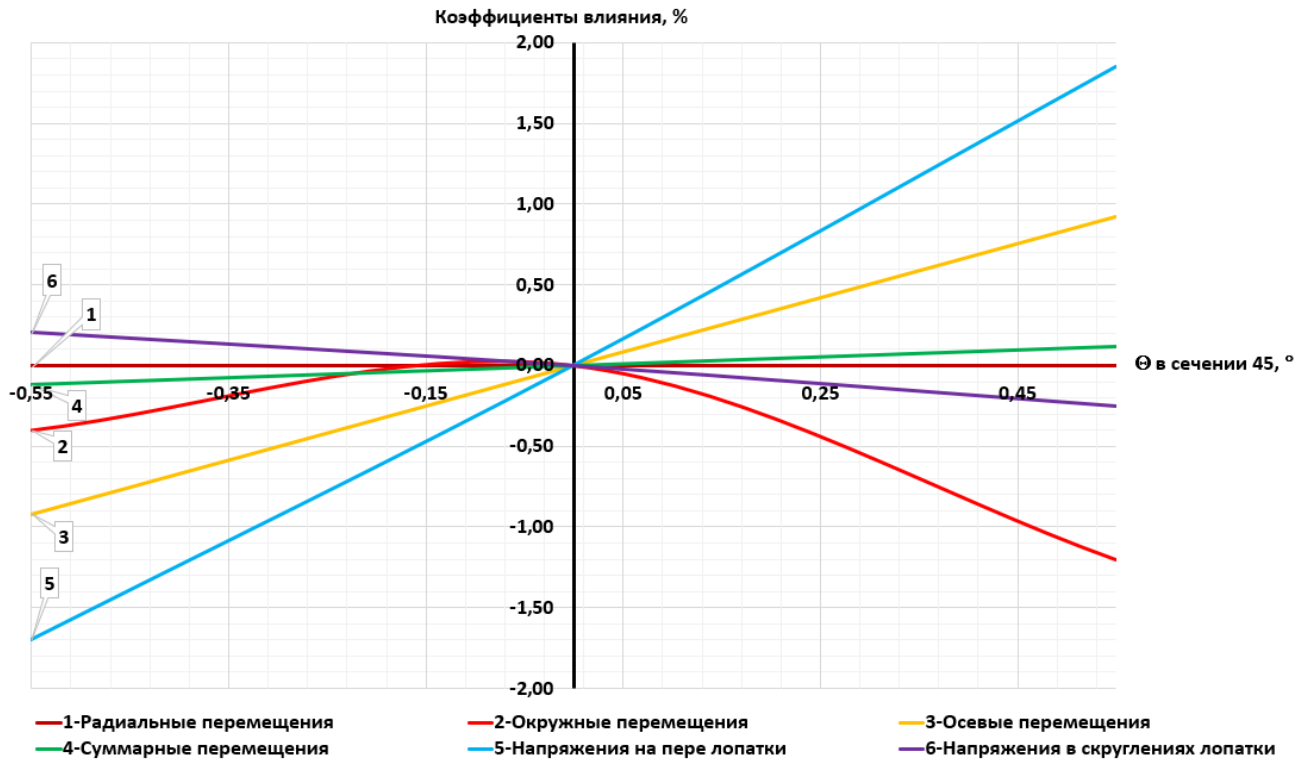


Рисунок В.7 – График зависимости для моделей 7\_C\_min и 7\_C\_max

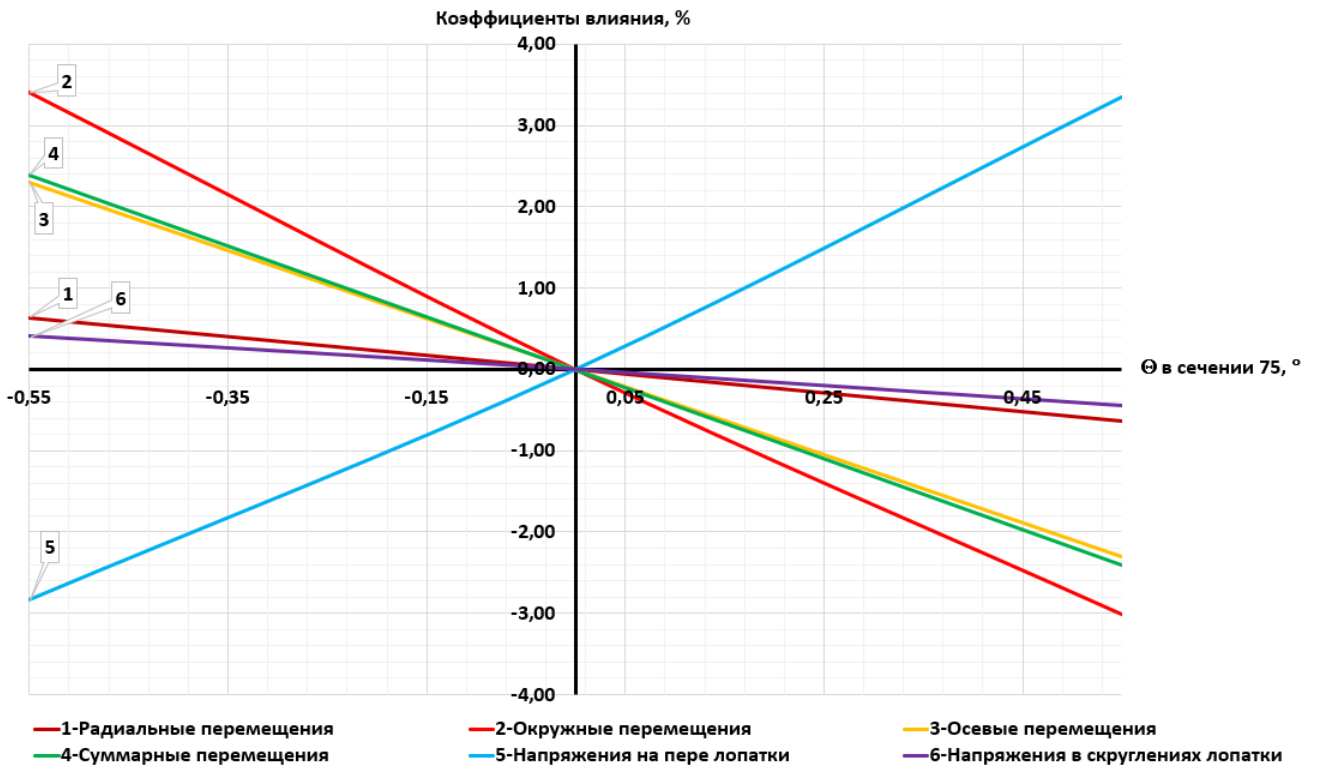


Рисунок В.8 – График зависимости для моделей 8\_C\_min и 8\_C\_max

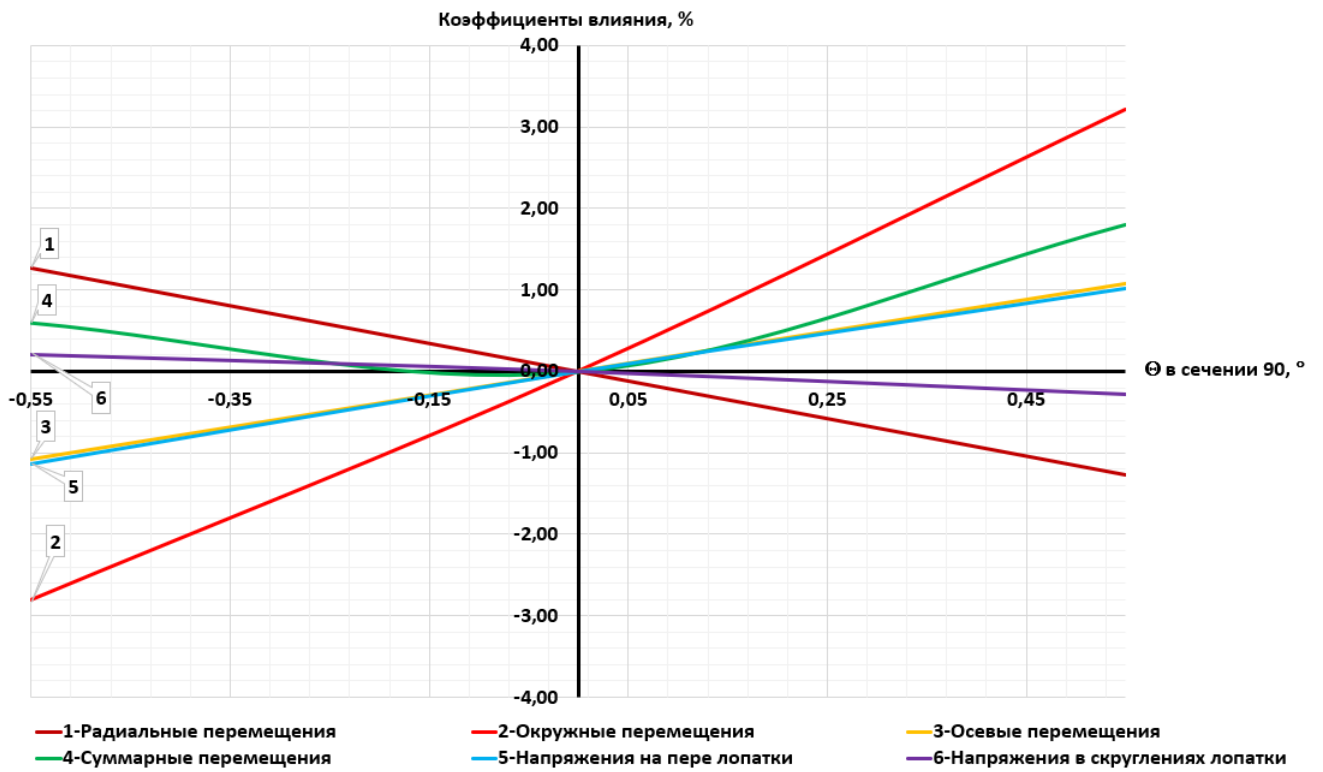


Рисунок В.9 – График зависимости для моделей 9\_C\_min и 9\_C\_max

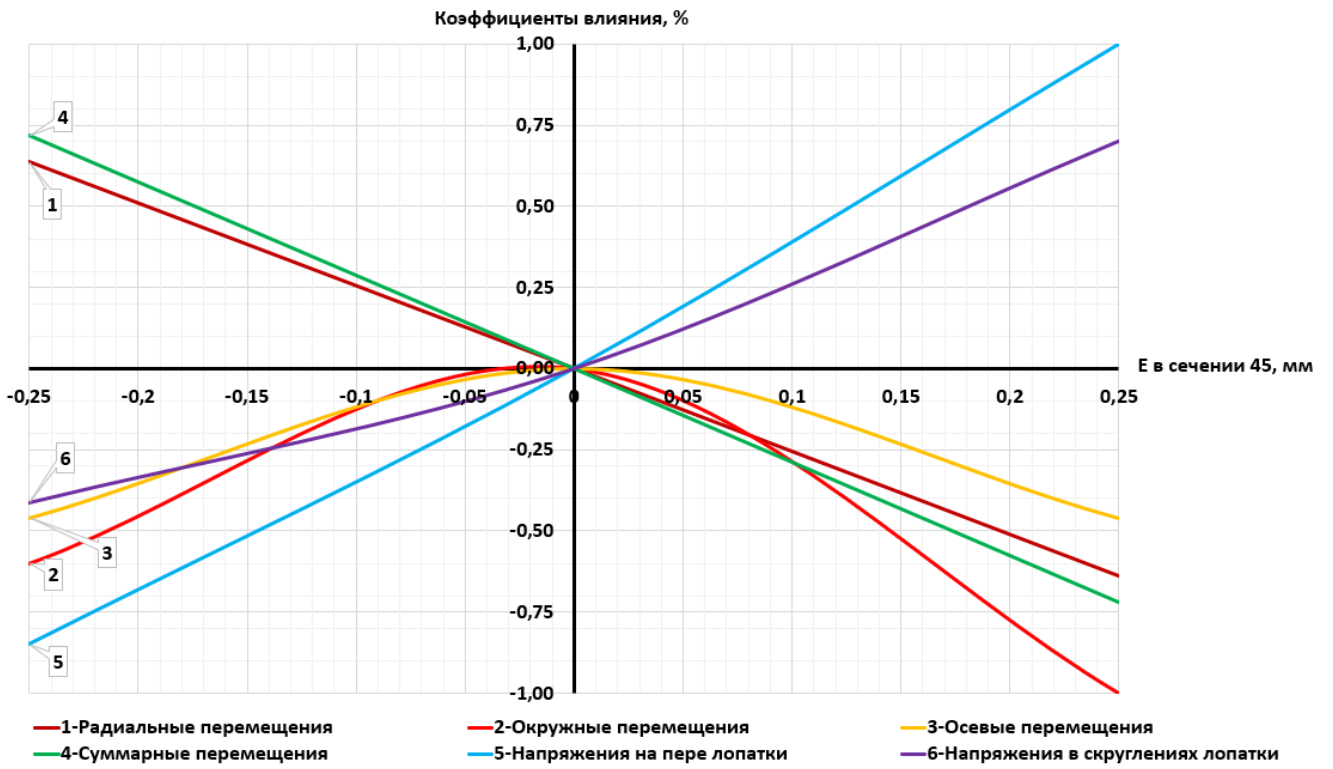


Рисунок В.10 – График зависимости для моделей 10\_C\_min и 10\_C\_max

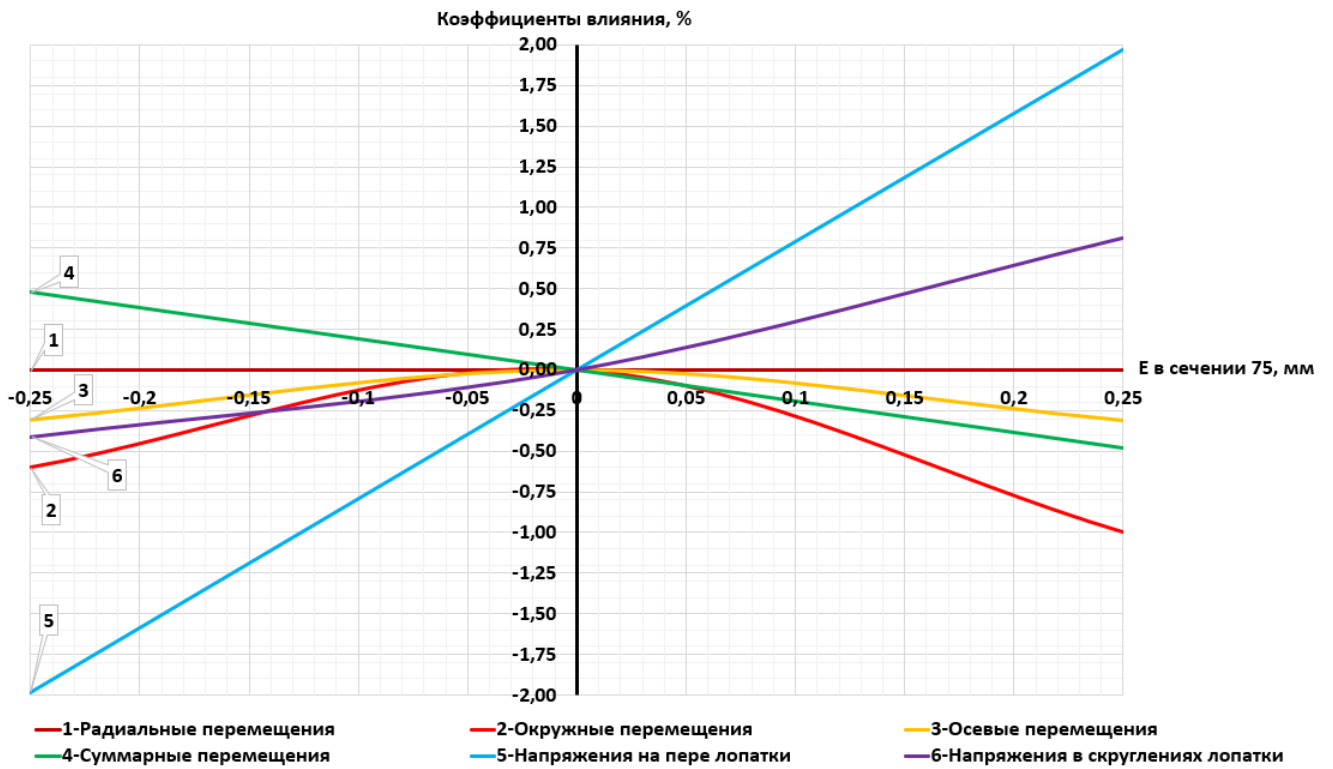


Рисунок В.11 – График зависимости для моделей 11\_C\_min и 11\_C\_max

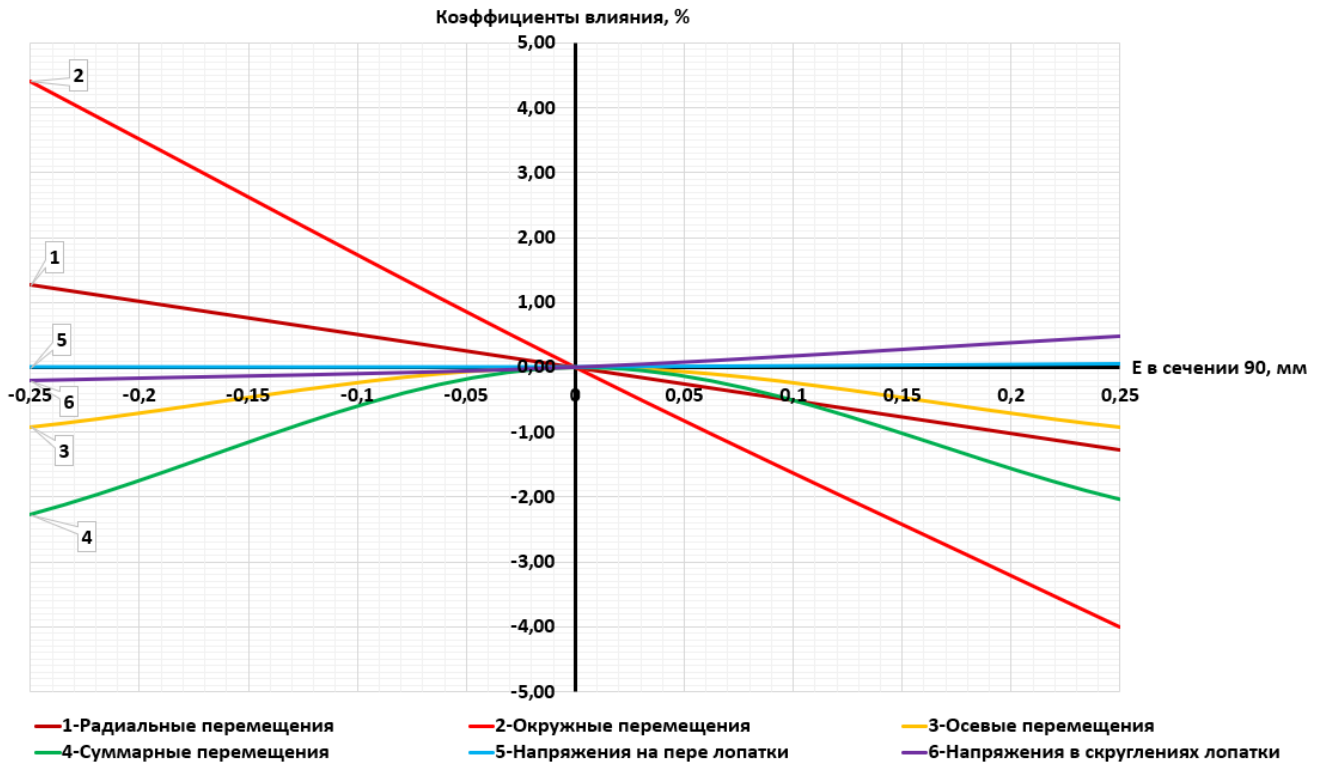


Рисунок В.12 – График зависимости для моделей 12\_C\_min и 12\_C\_max

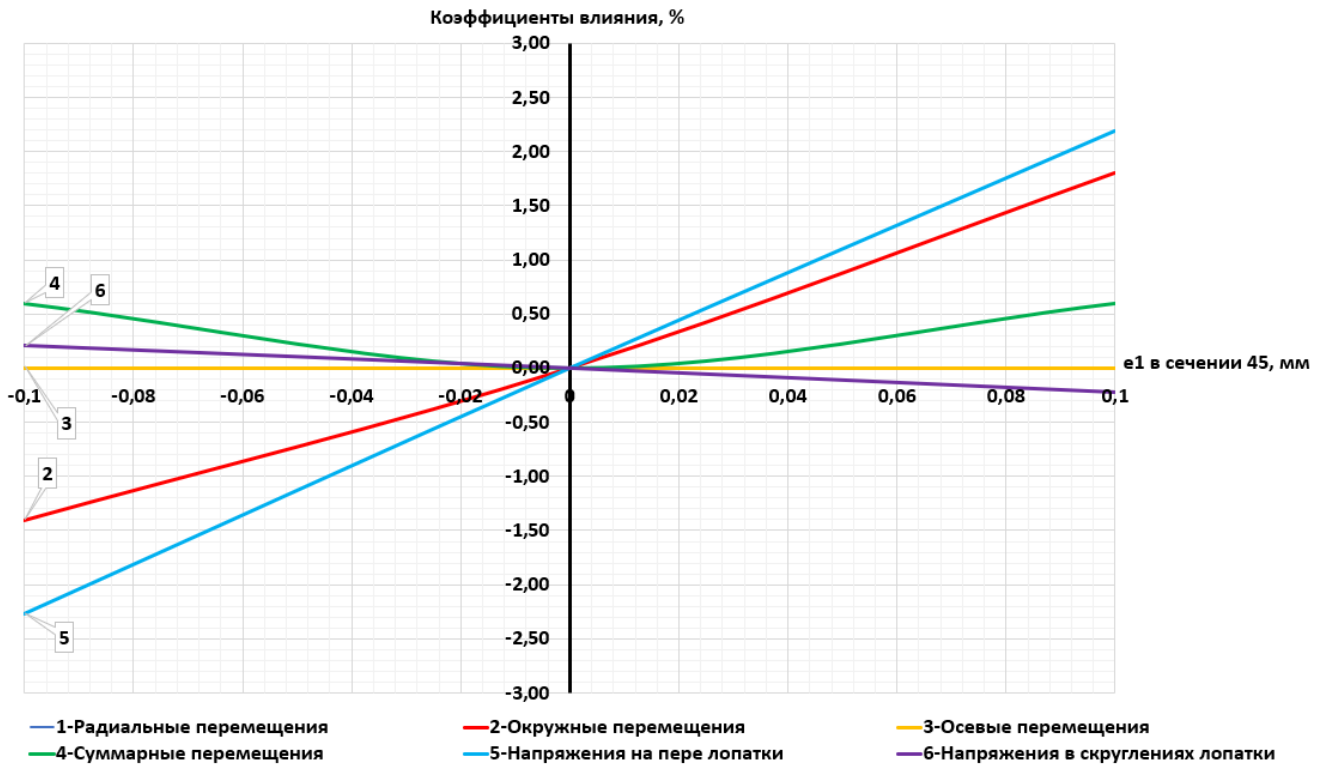


Рисунок В.13 – График зависимости для моделей 13\_C\_min и 13\_C\_max

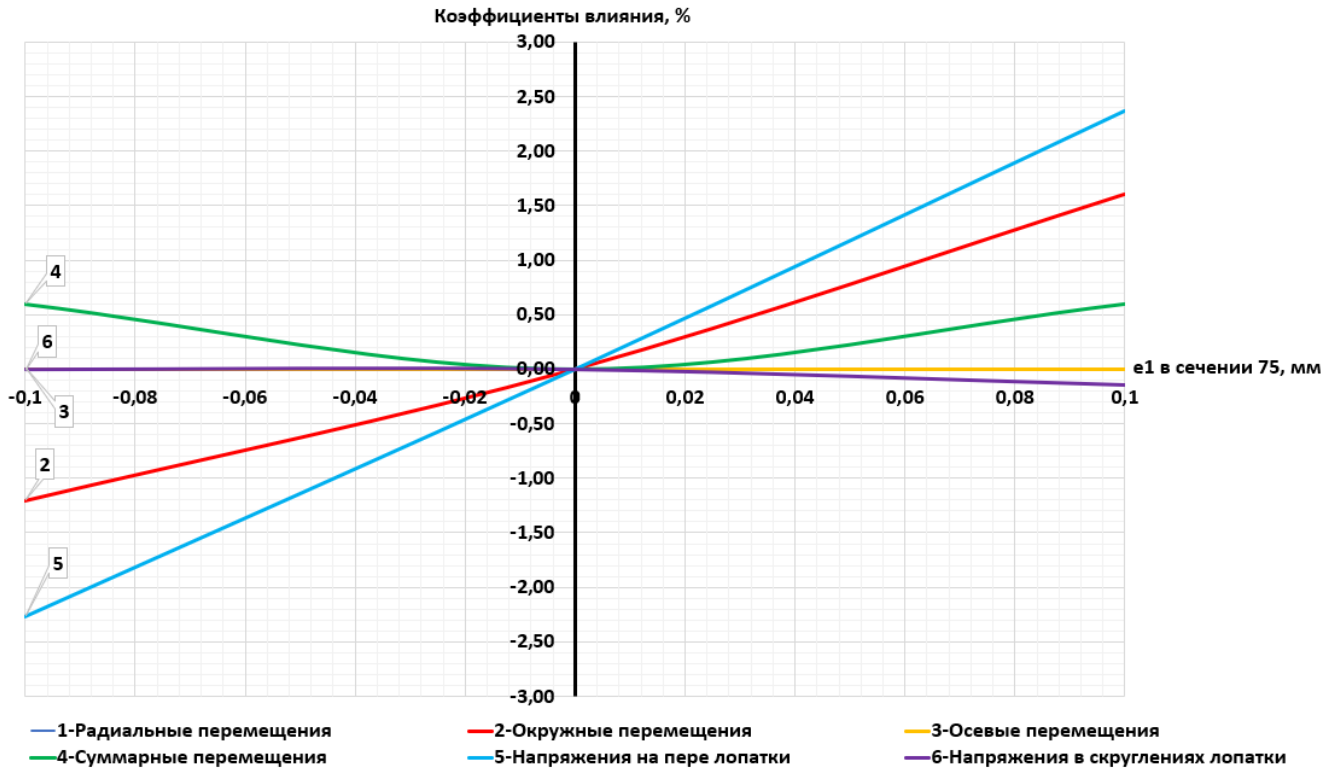


Рисунок В.14 – График зависимости для моделей 14\_C\_min и 14\_C\_max

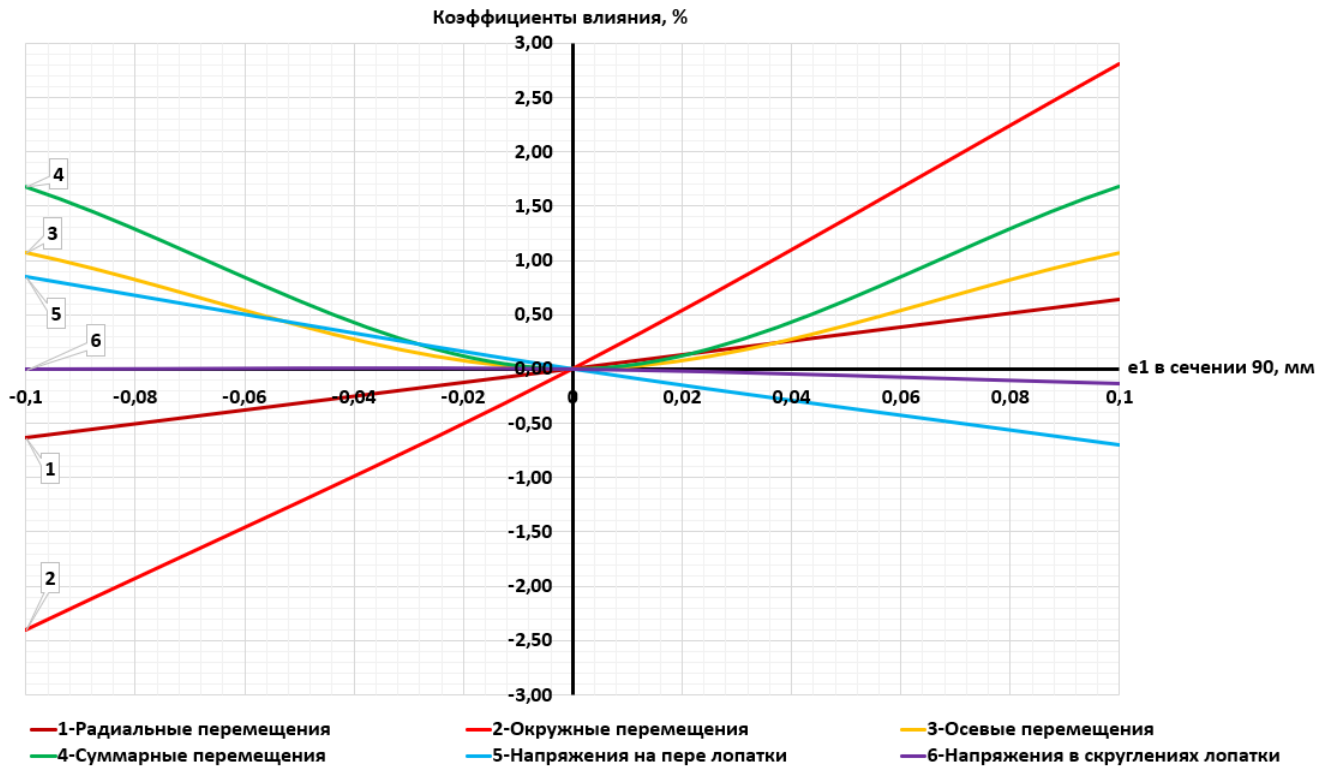


Рисунок В.15 – График зависимости для моделей 15\_C\_min и 15\_C\_max

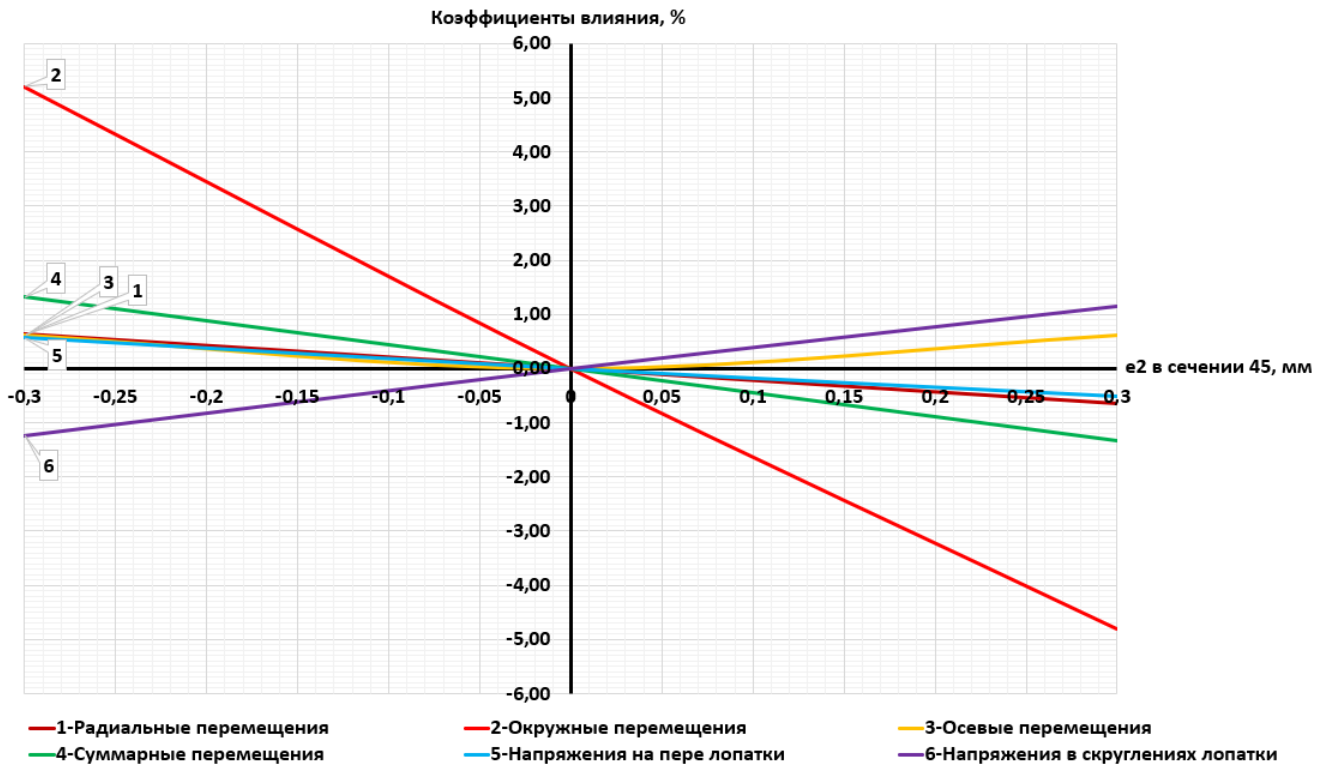


Рисунок В.16 – График зависимости для моделей 16\_C\_min и 16\_C\_max

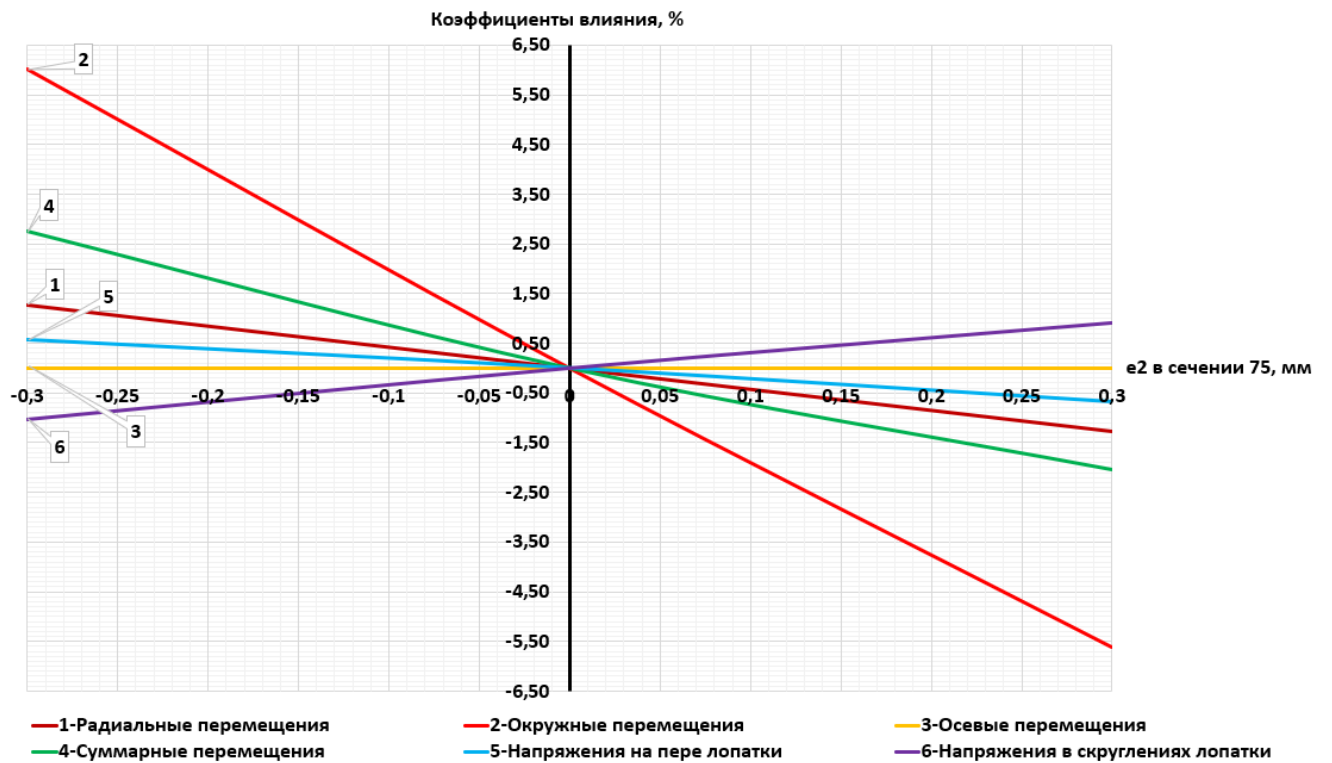


Рисунок В.17 – График зависимости для моделей 17\_C\_min и 17\_C\_max

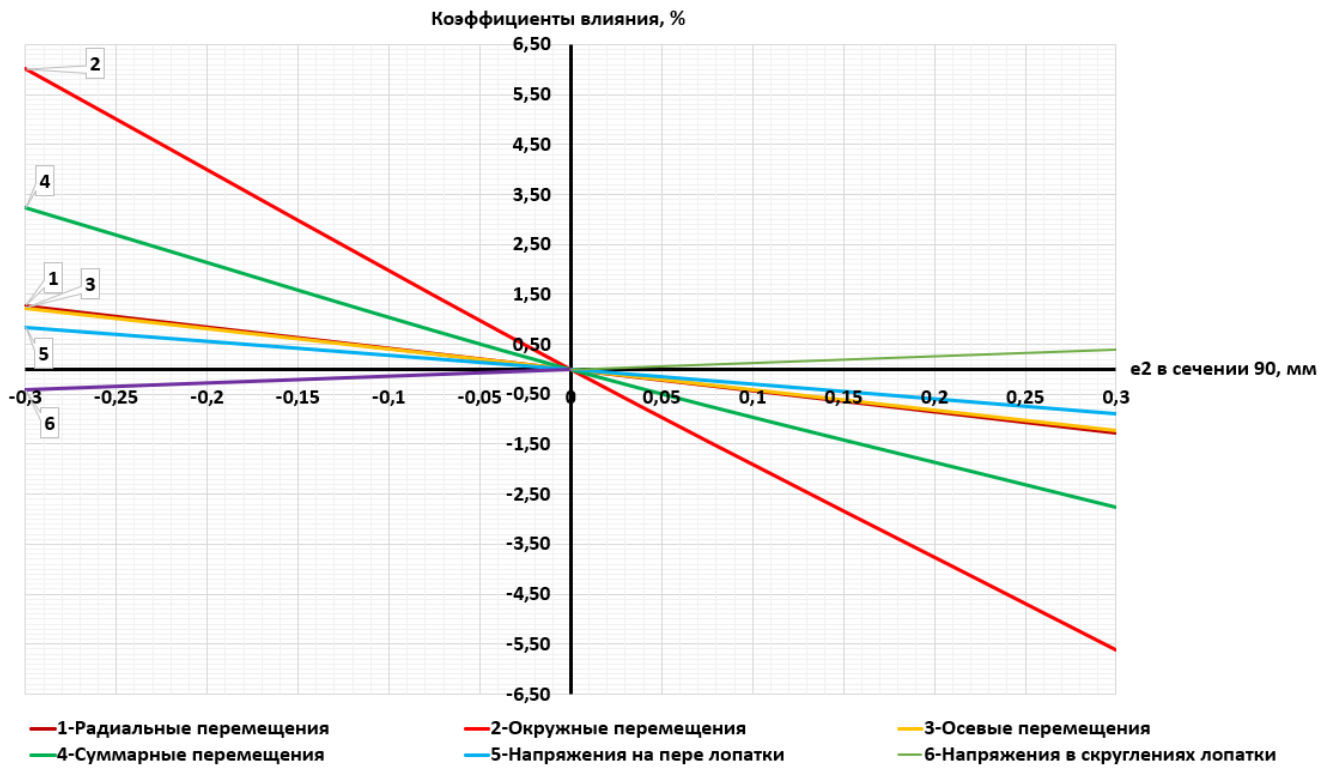


Рисунок В.18 – График зависимости для моделей 18\_C\_min и 18\_C\_max

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное)

Графические зависимости между варьируемыми геометрическими переменными и аэродинамическими характеристиками лопатки вентилятора

Для оценки влияния производственных отклонений и создания модели экспресс-анализа построены графики чувствительности аэродинамических характеристик лопатки к изменению ее геометрии. На них показана зависимость коэффициентов влияния (относительных отклонений напряжений и перемещений) от вариации геометрических параметров в пределах допусков (см. Рисунки Г.1-Г.18).

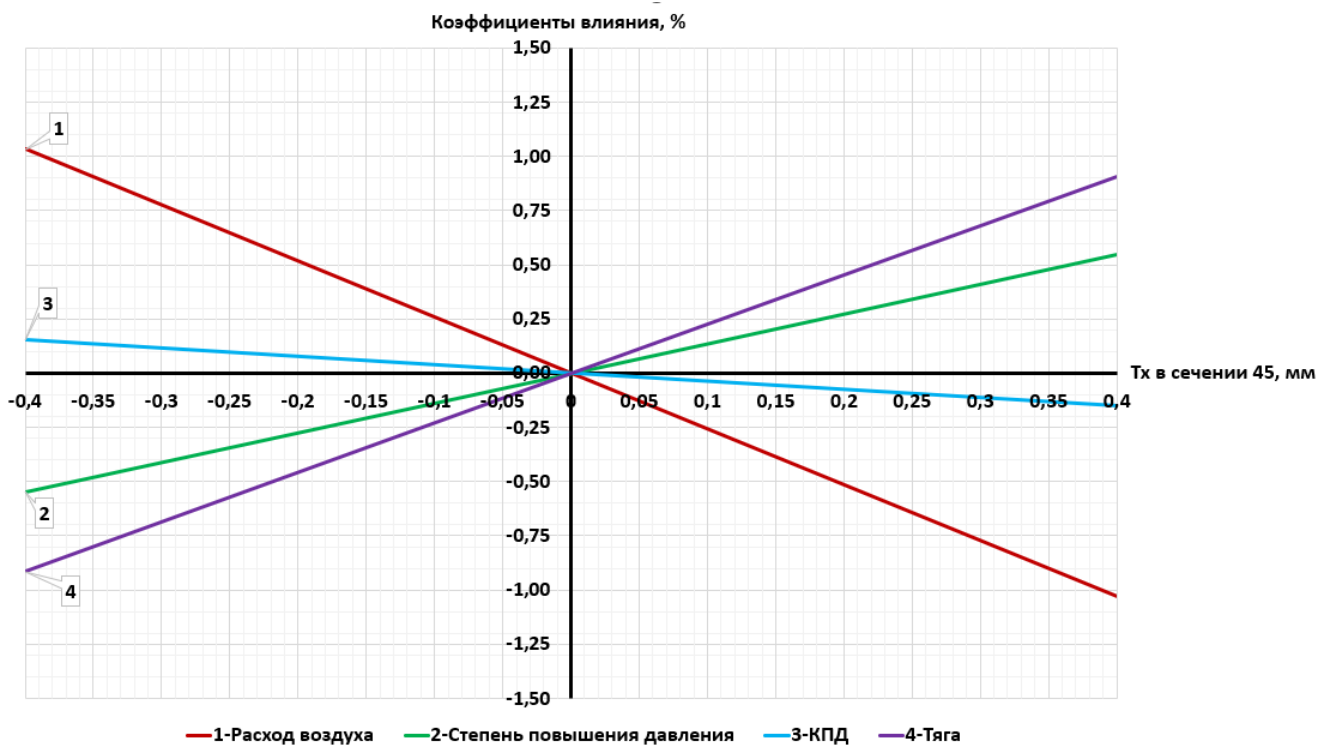


Рисунок Г.1 – График зависимости для моделей 1\_H\_min и 1\_H\_max

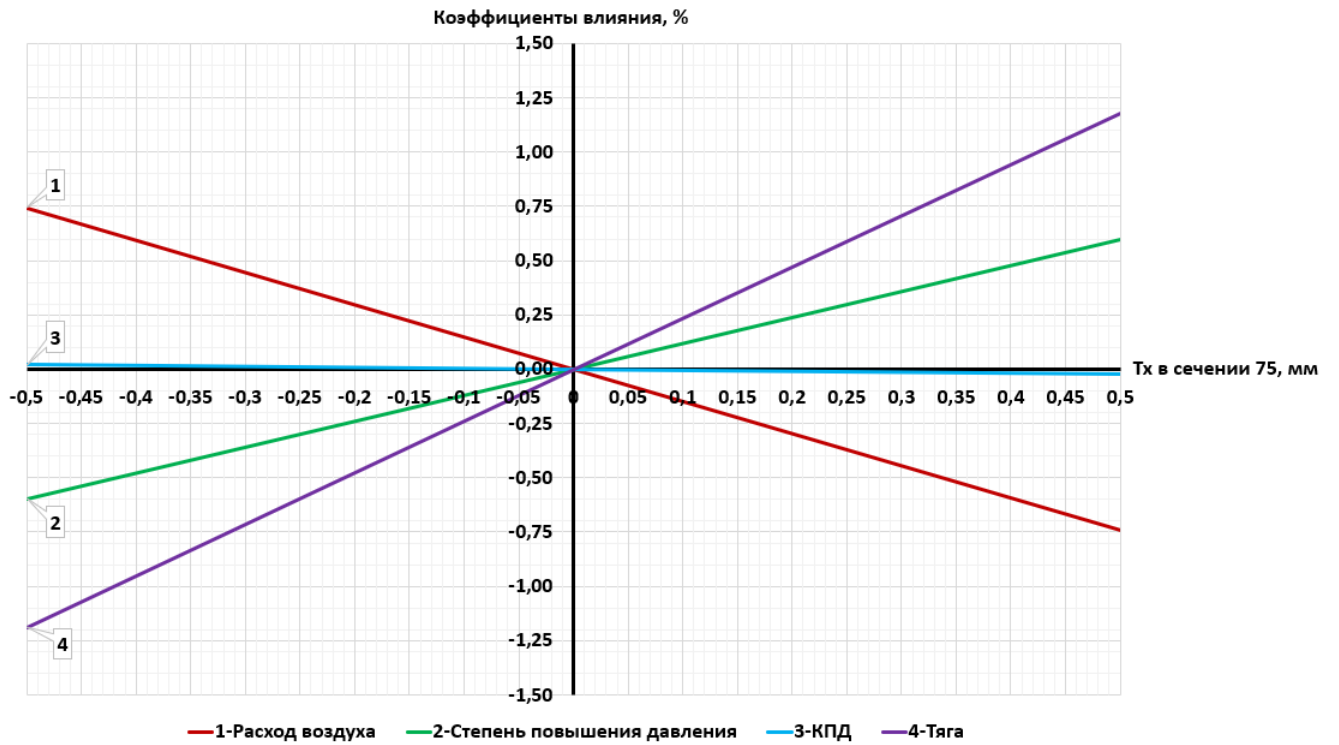


Рисунок Г.2 – График зависимости для моделей 2\_H\_min и 2\_H\_max

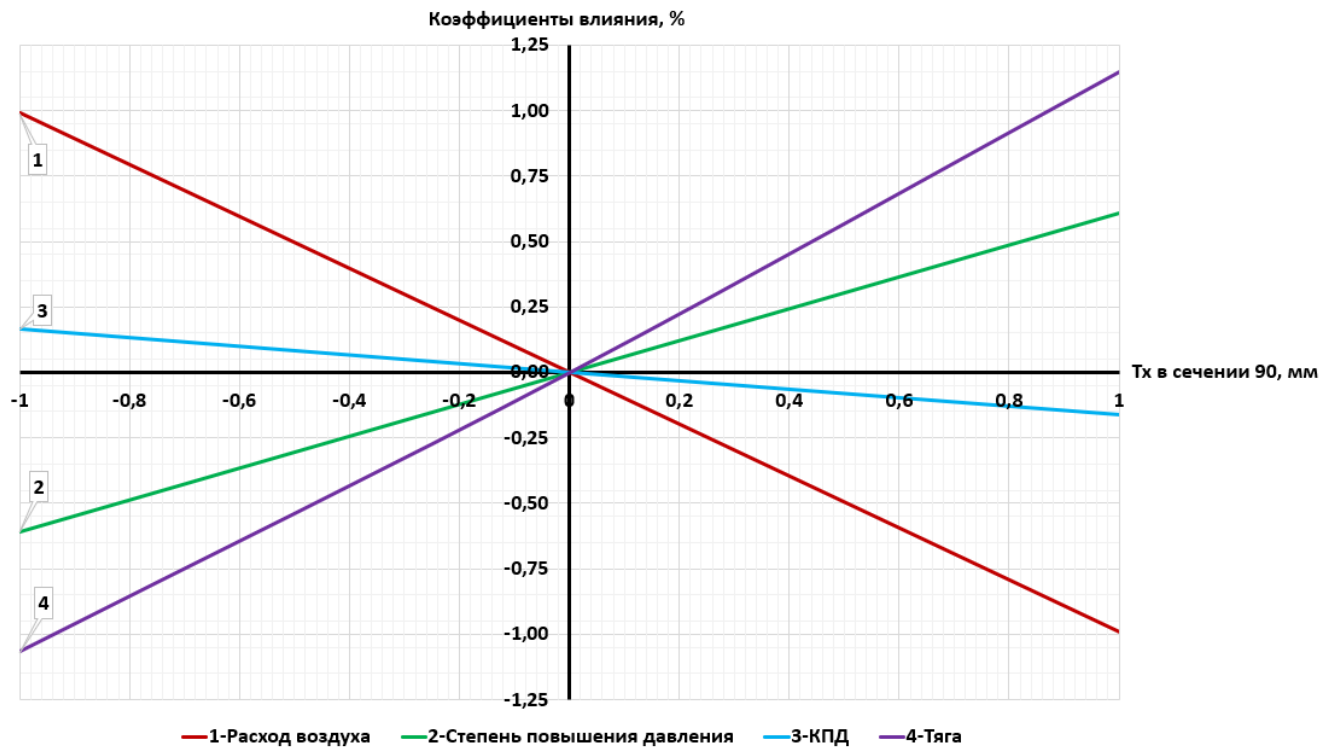


Рисунок Г.3 – График зависимости для моделей 3\_H\_min и 3\_H\_max

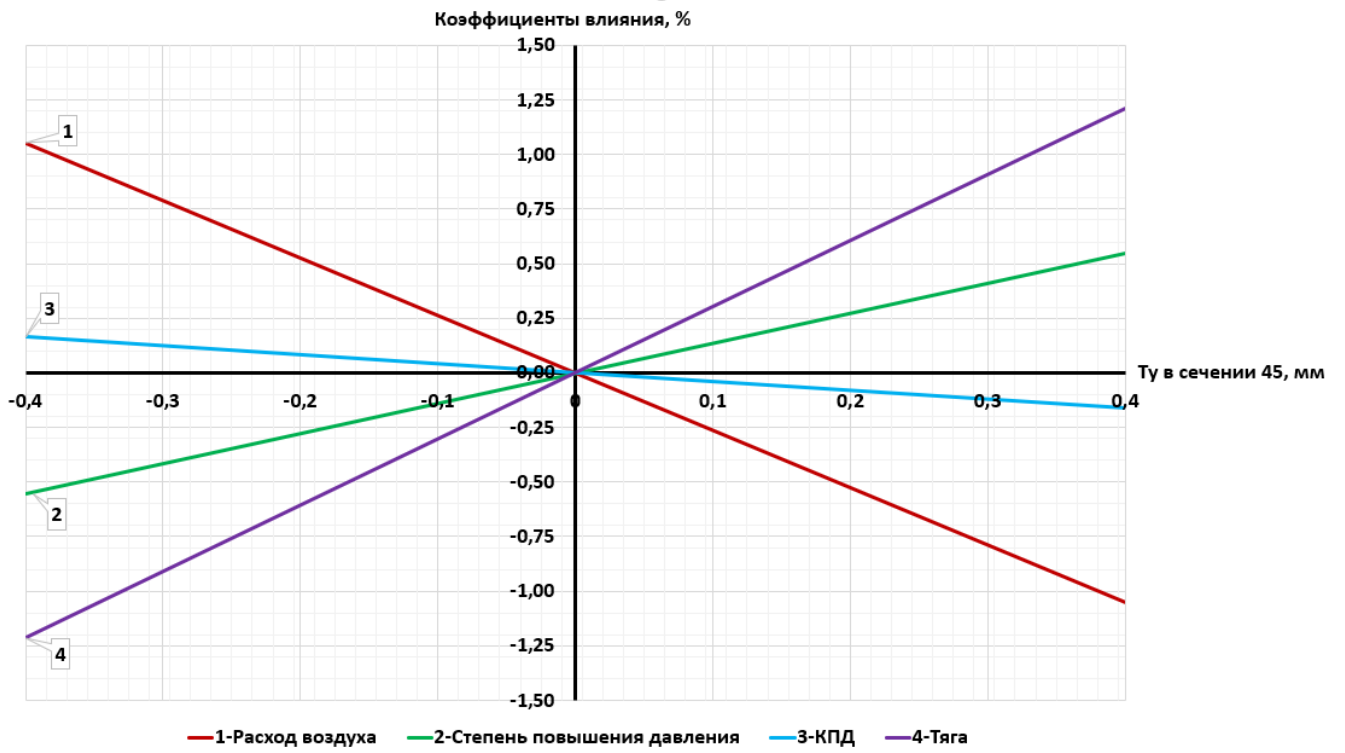


Рисунок Г.4 – График зависимости для моделей 4\_H\_min и 4\_H\_max

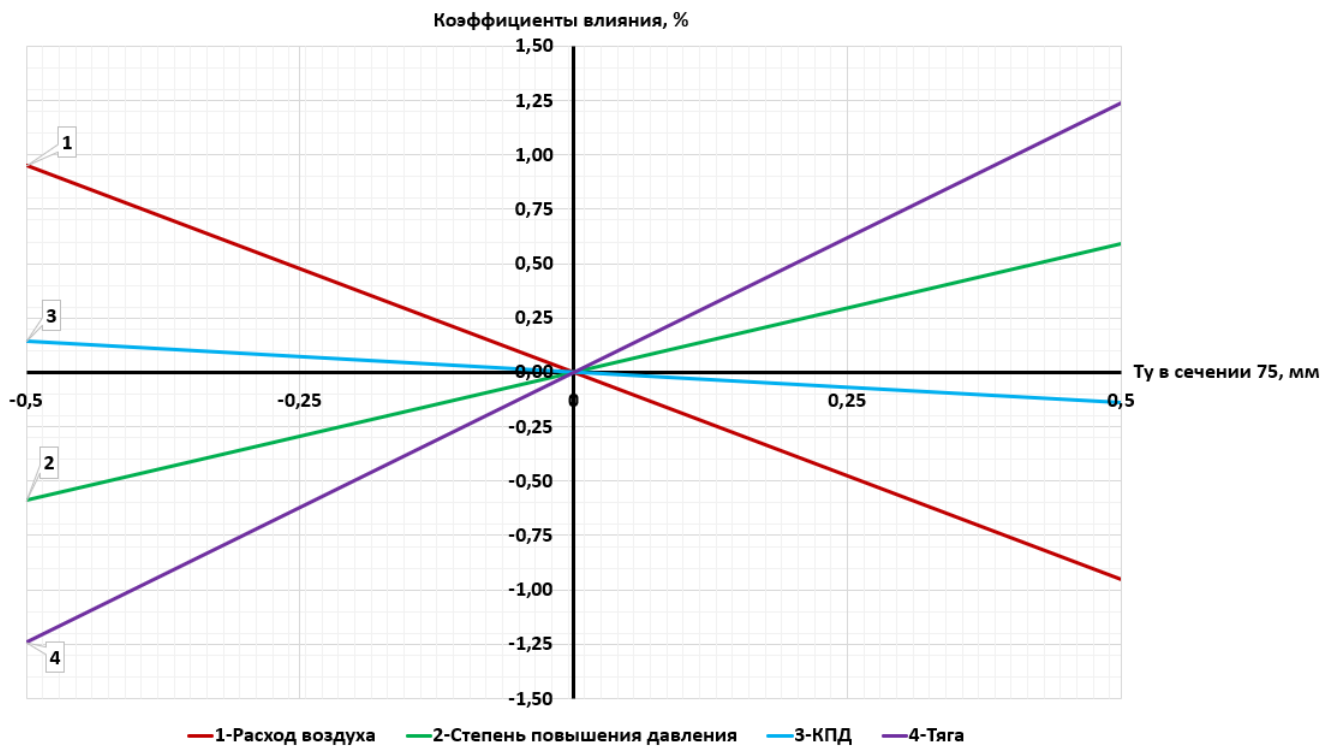


Рисунок Г.5 – График зависимости для моделей 5\_H\_min и 5\_H\_max

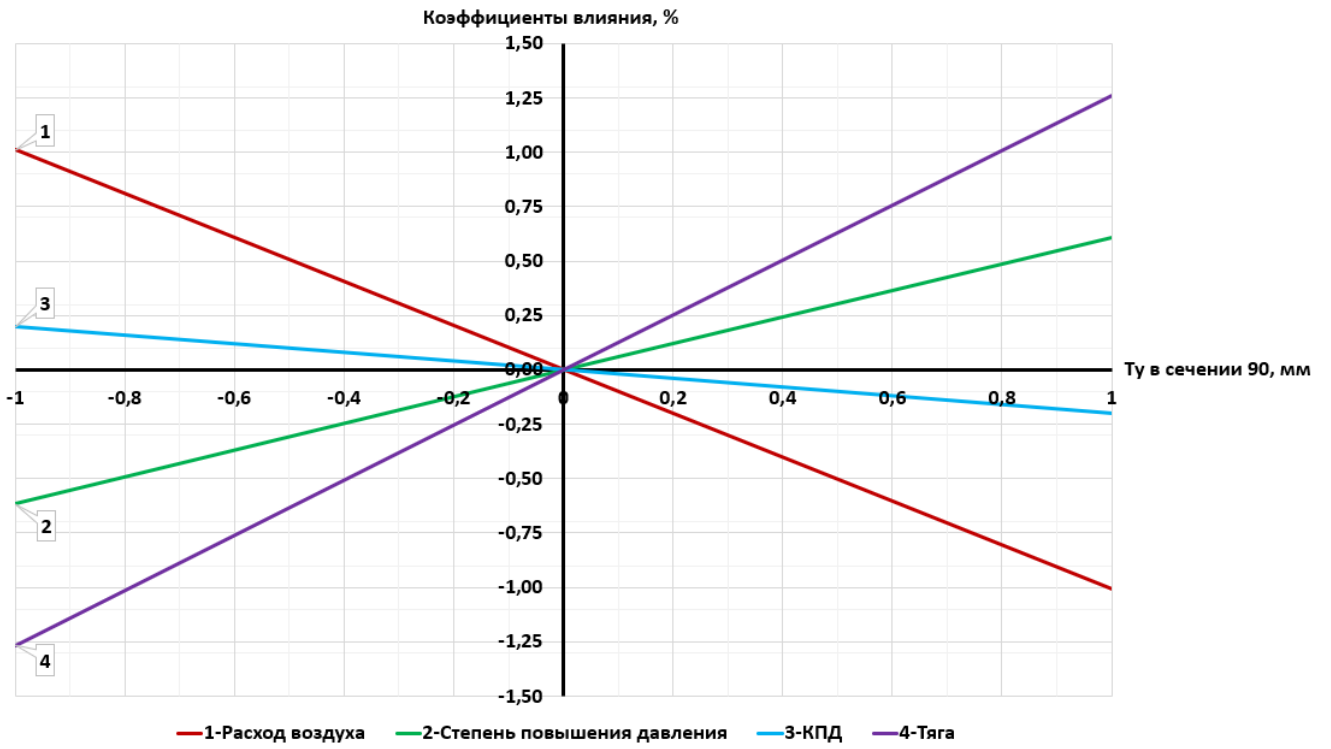


Рисунок Г.6 – График зависимости для моделей 6\_H\_min и 6\_H\_max

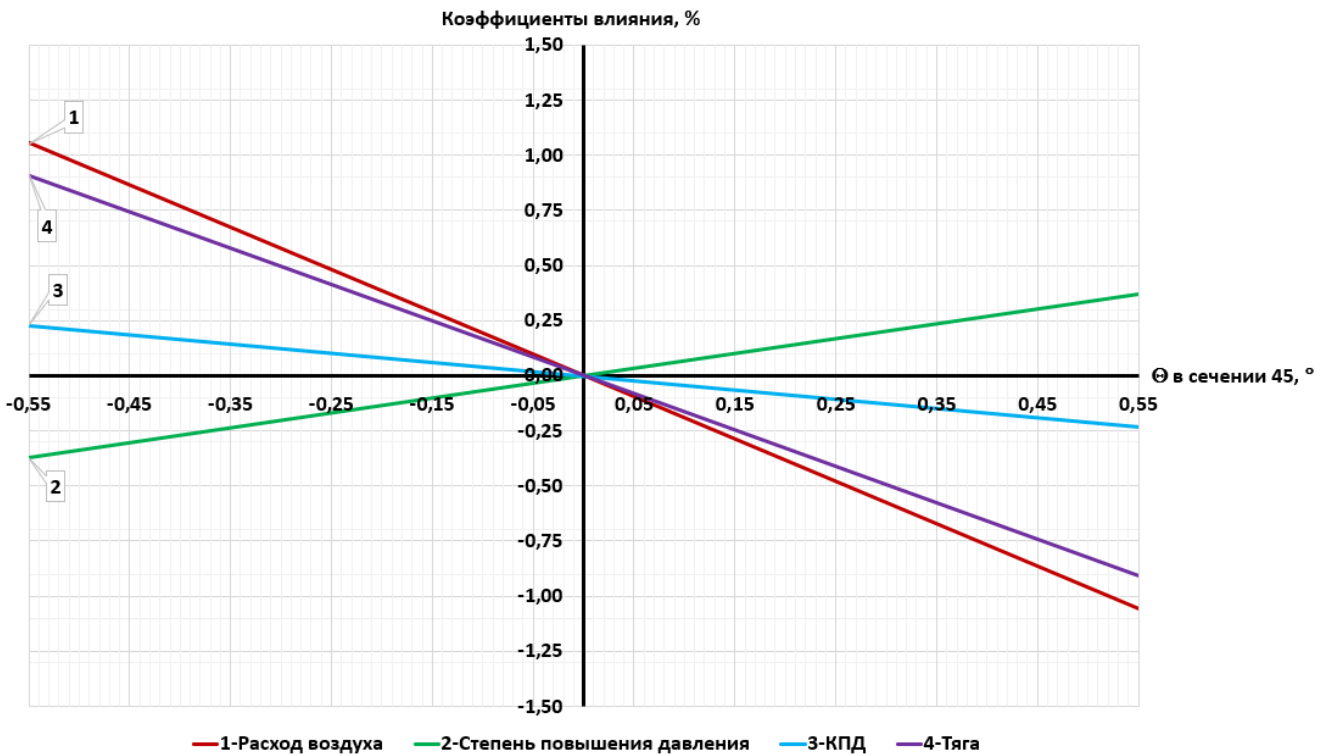


Рисунок Г.7 – График зависимости для моделей 7\_H\_min и 7\_H\_max

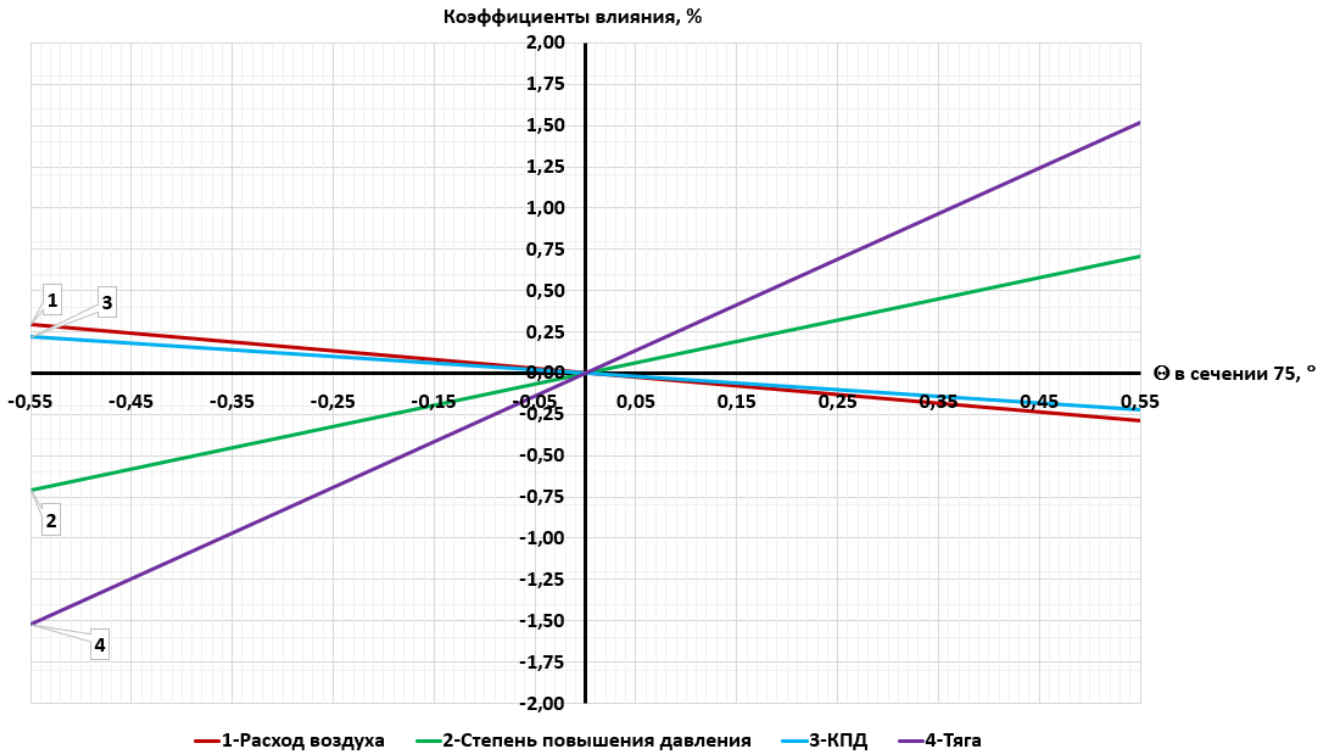


Рисунок Г.8 – График зависимости для моделей 8\_H\_min и 8\_H\_max

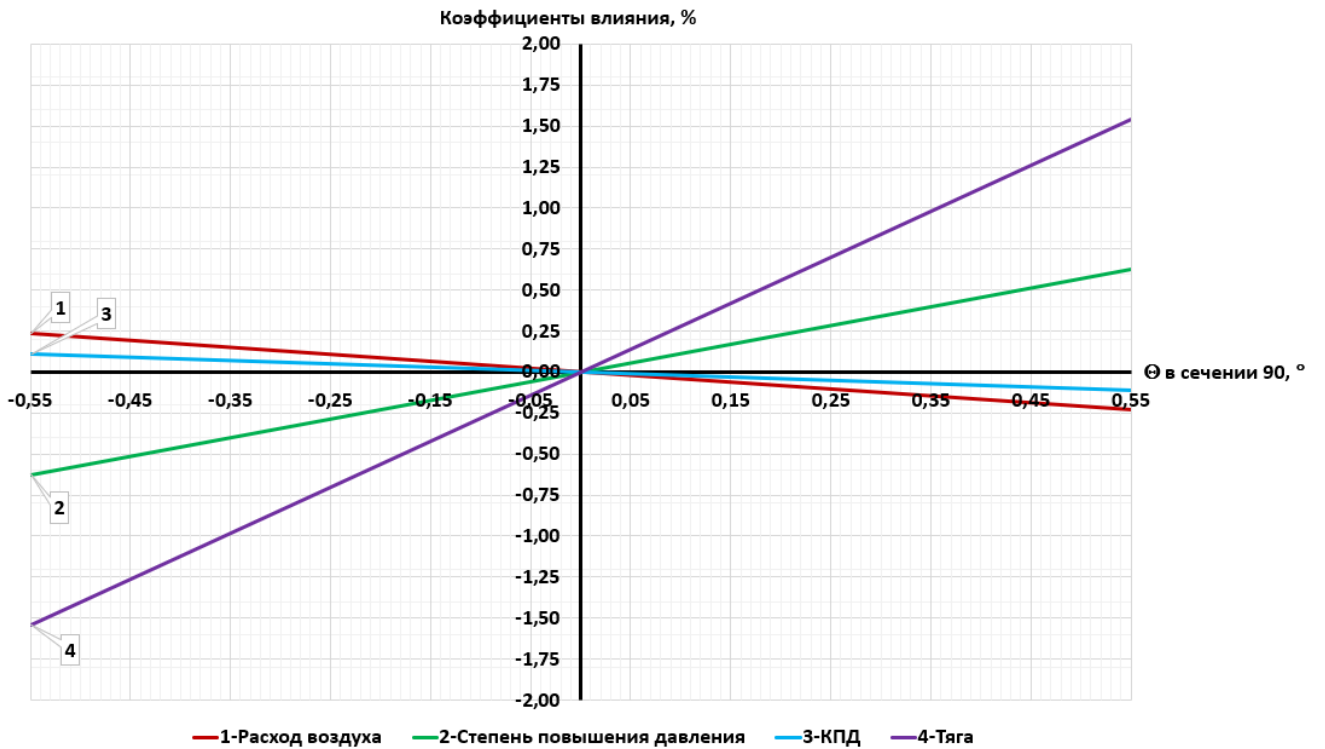


Рисунок Г.9 – График зависимости для моделей 9\_H\_min и 9\_H\_max

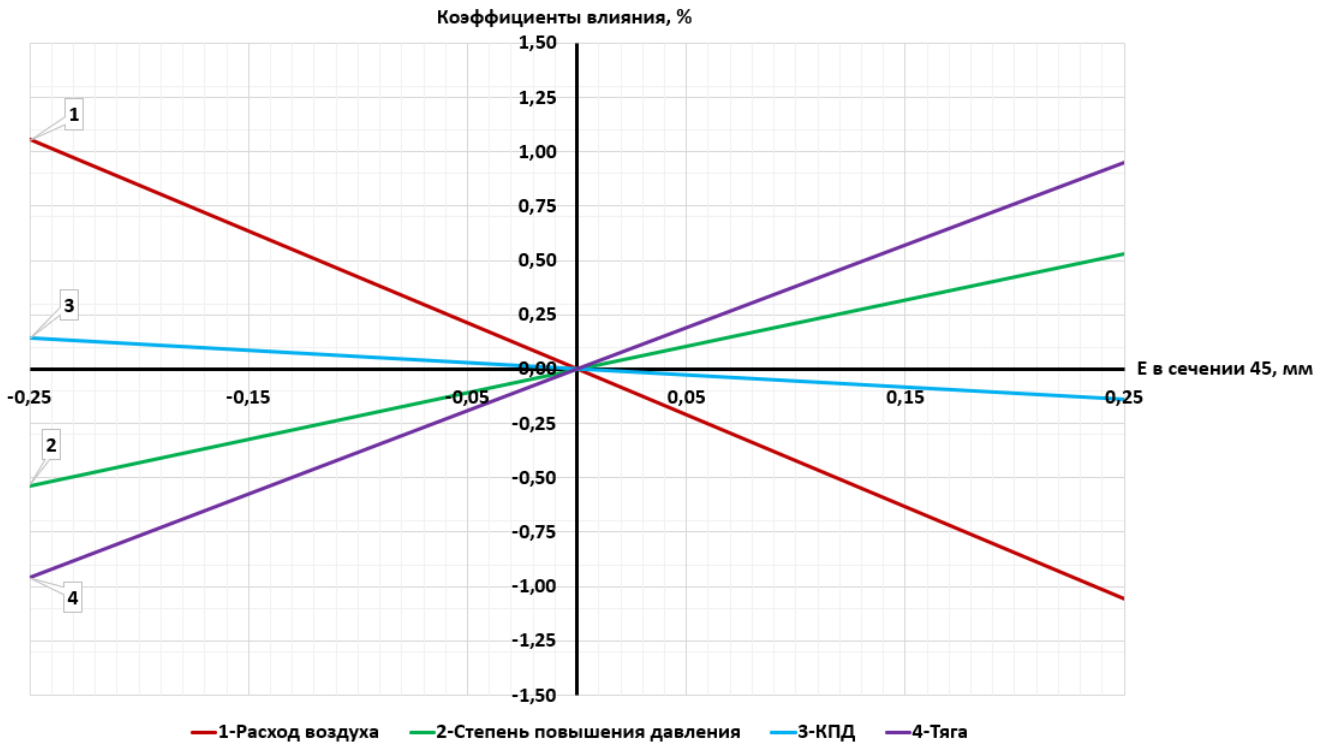


Рисунок Г.10 – График зависимости для моделей 10\_H\_min и 10\_H\_max

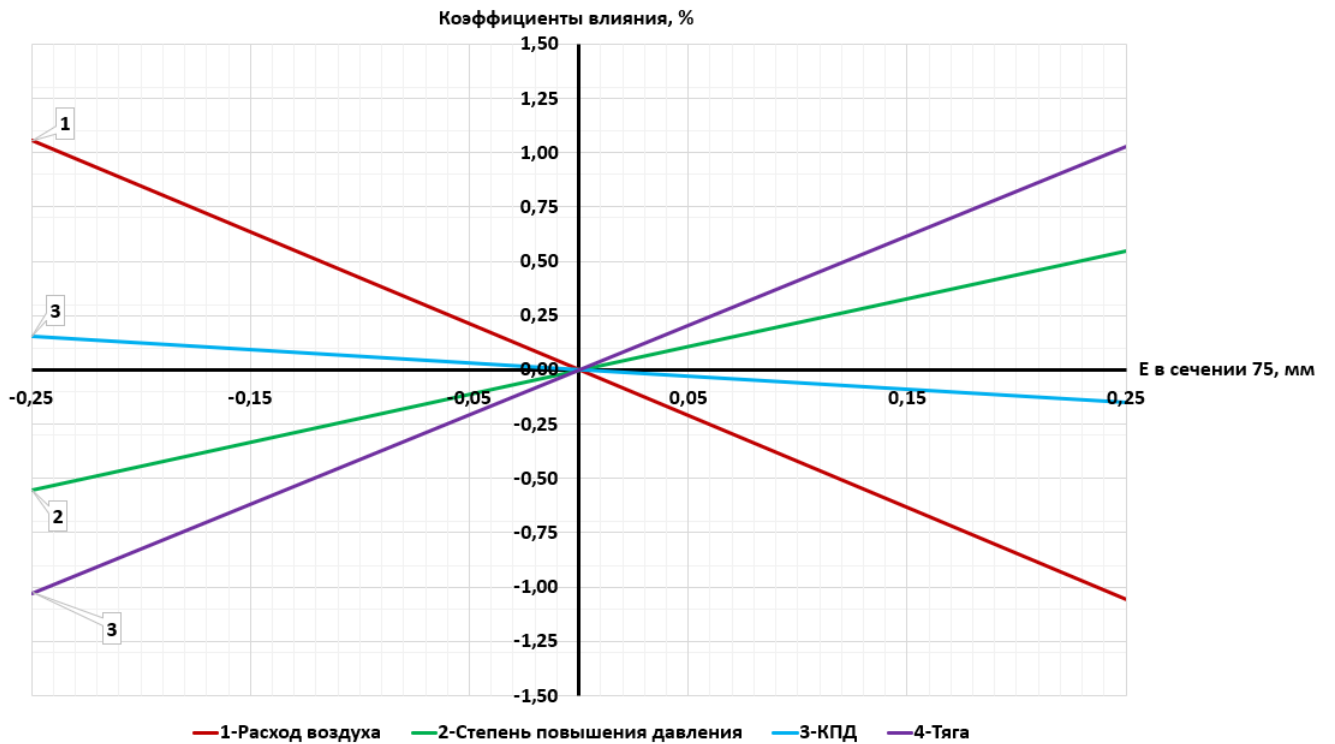


Рисунок Г.11 – График зависимости для моделей 11\_H\_min и 11\_H\_max

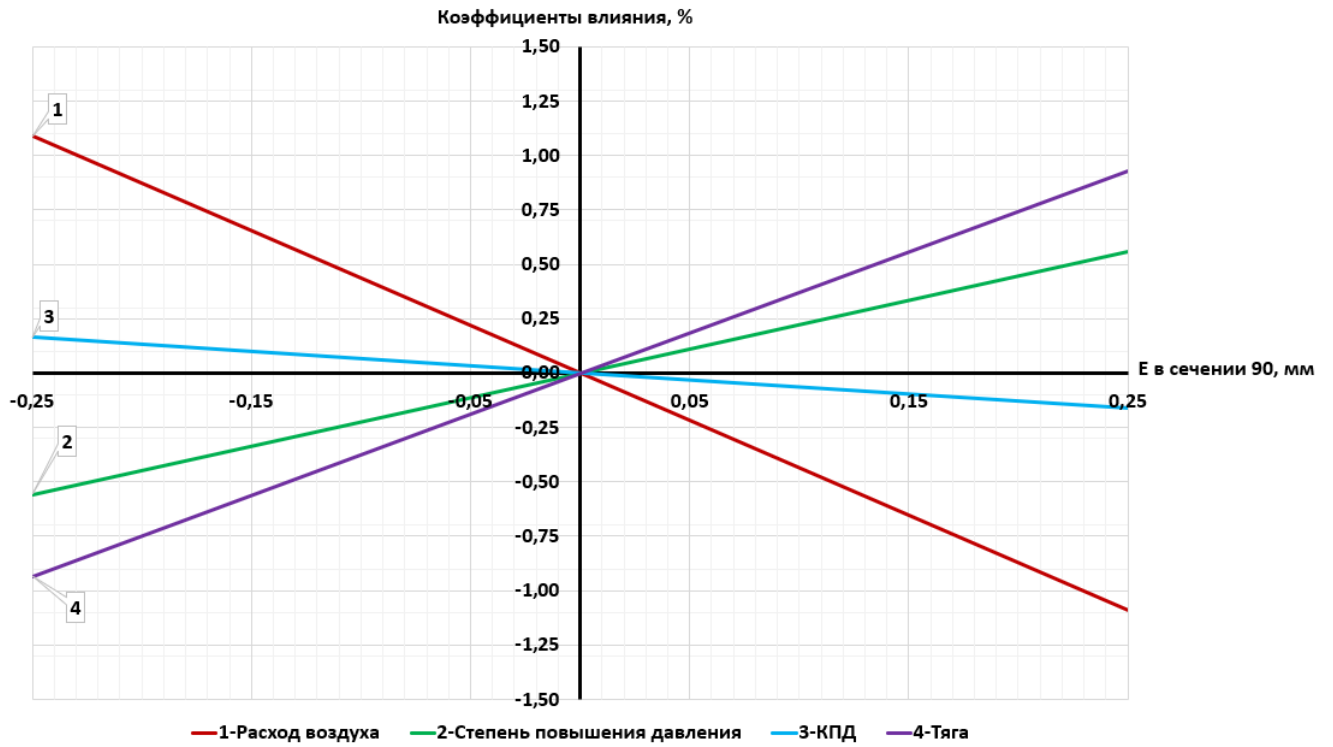


Рисунок Г.12 – График зависимости для моделей 12\_H\_min и 12\_H\_max

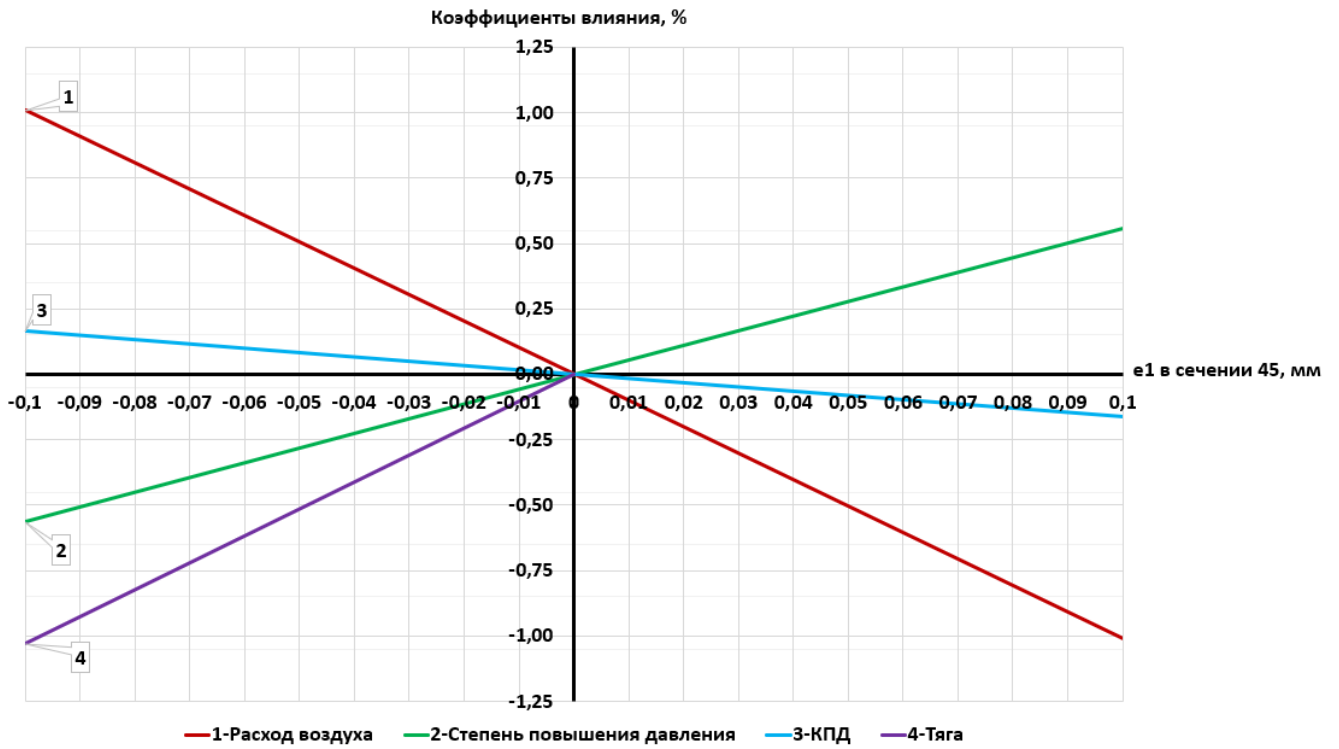


Рисунок Г.13 – График зависимости для моделей 13\_H\_min и 13\_H\_max

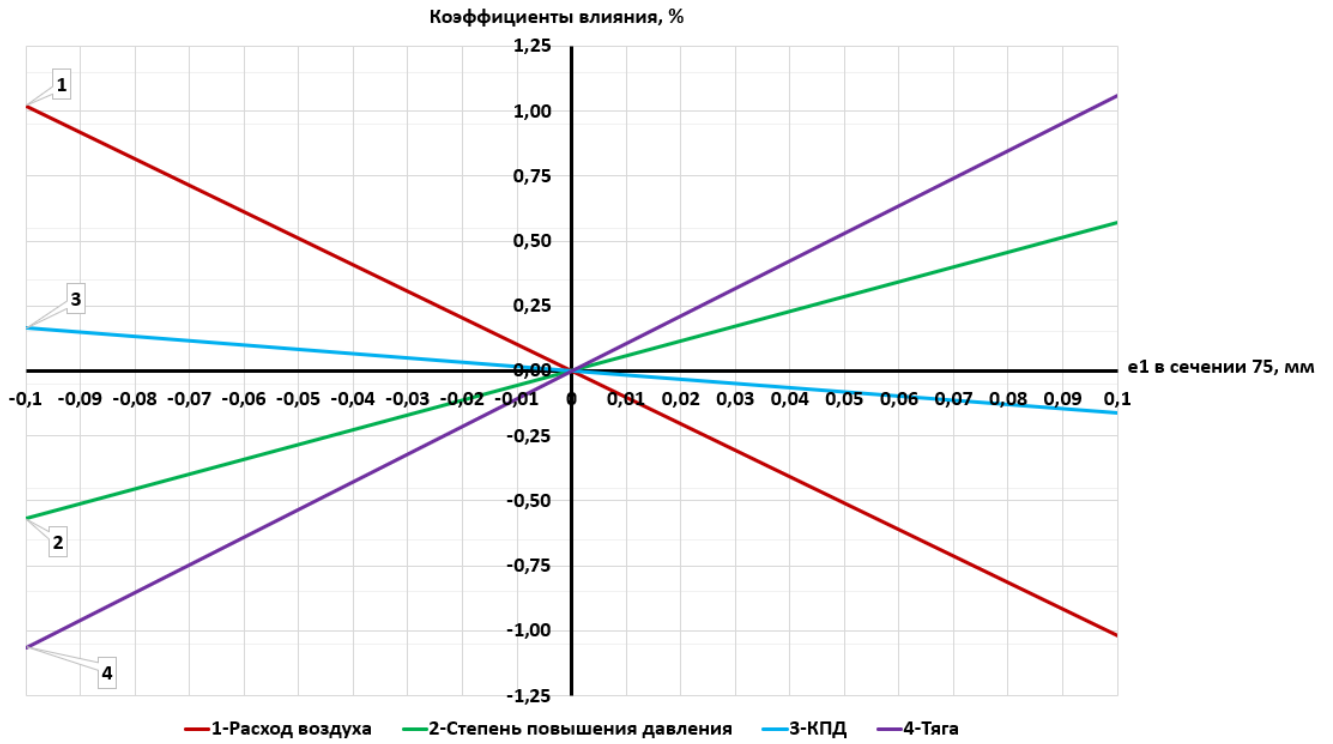


Рисунок Г.14 – График зависимости для моделей 14\_H\_min и 14\_H\_max

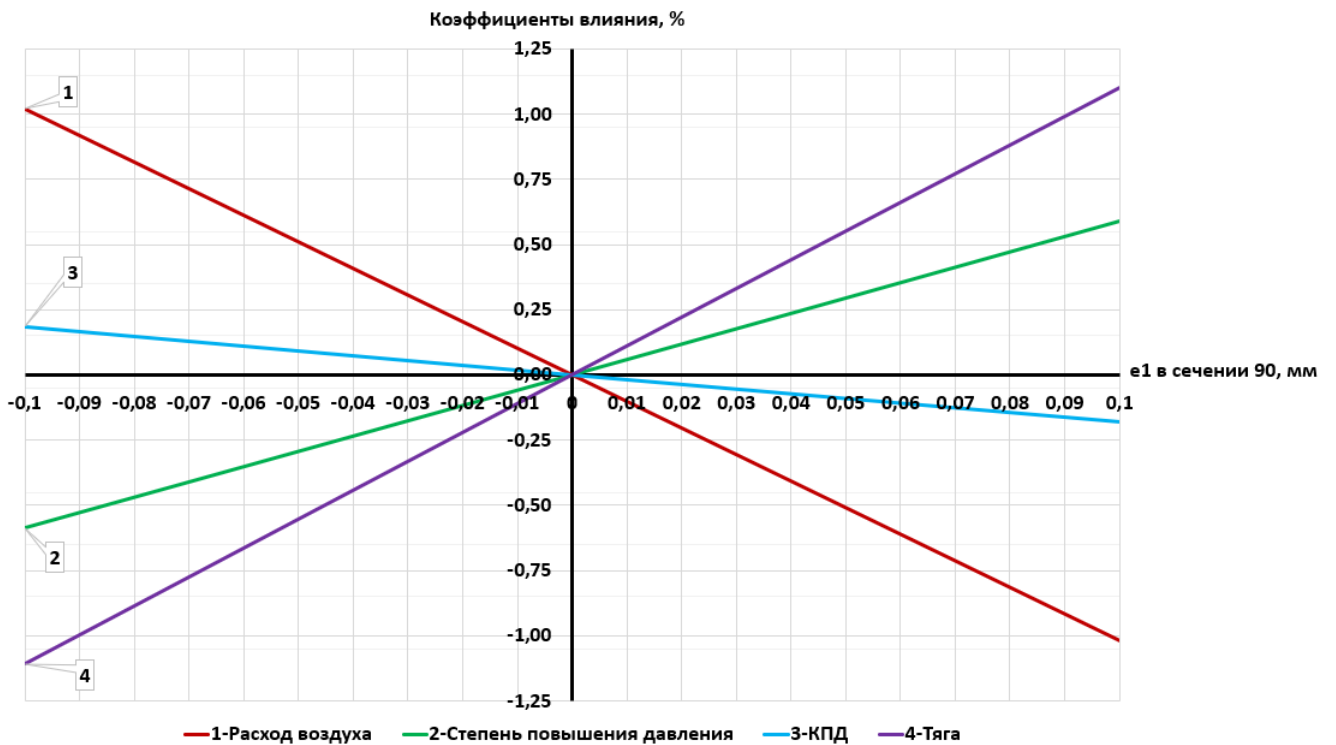


Рисунок Г.15 – График зависимости для моделей 15\_H\_min и 15\_H\_max

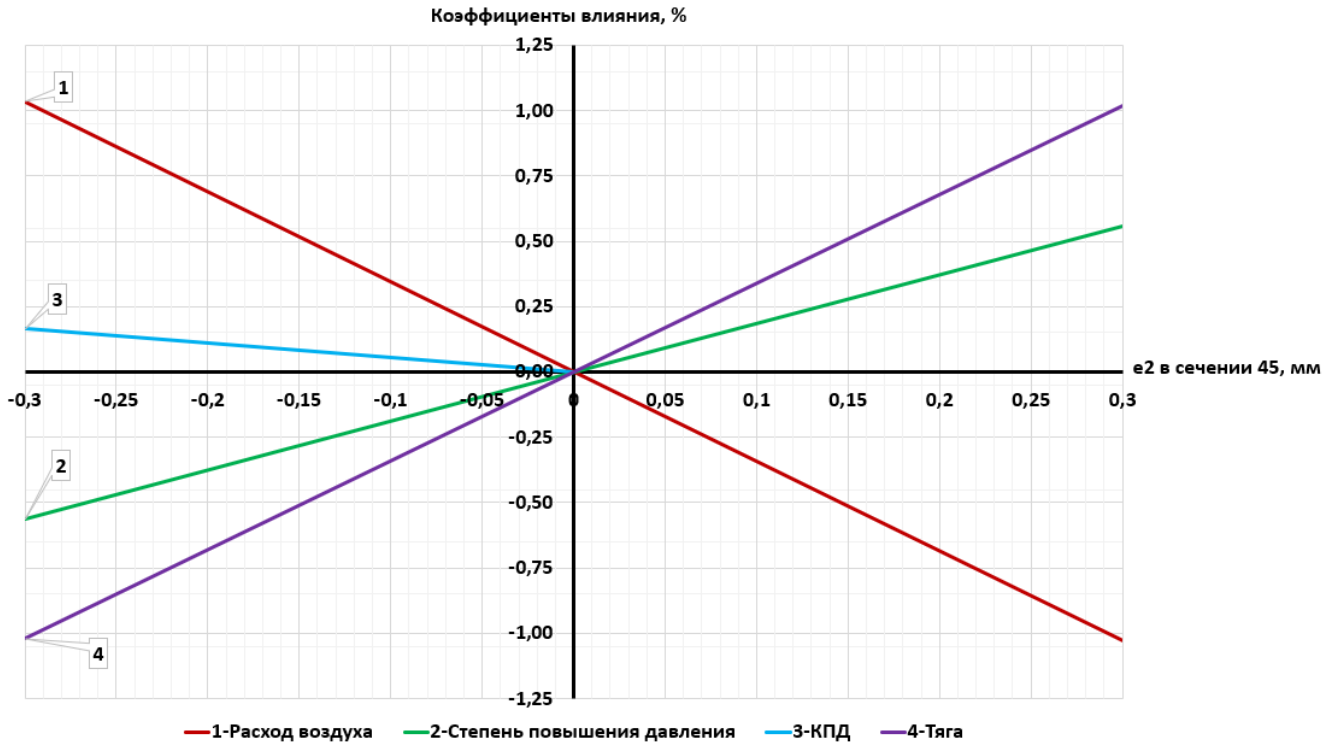


Рисунок Г.16 – График зависимости для моделей 16\_H\_min и 16\_H\_max

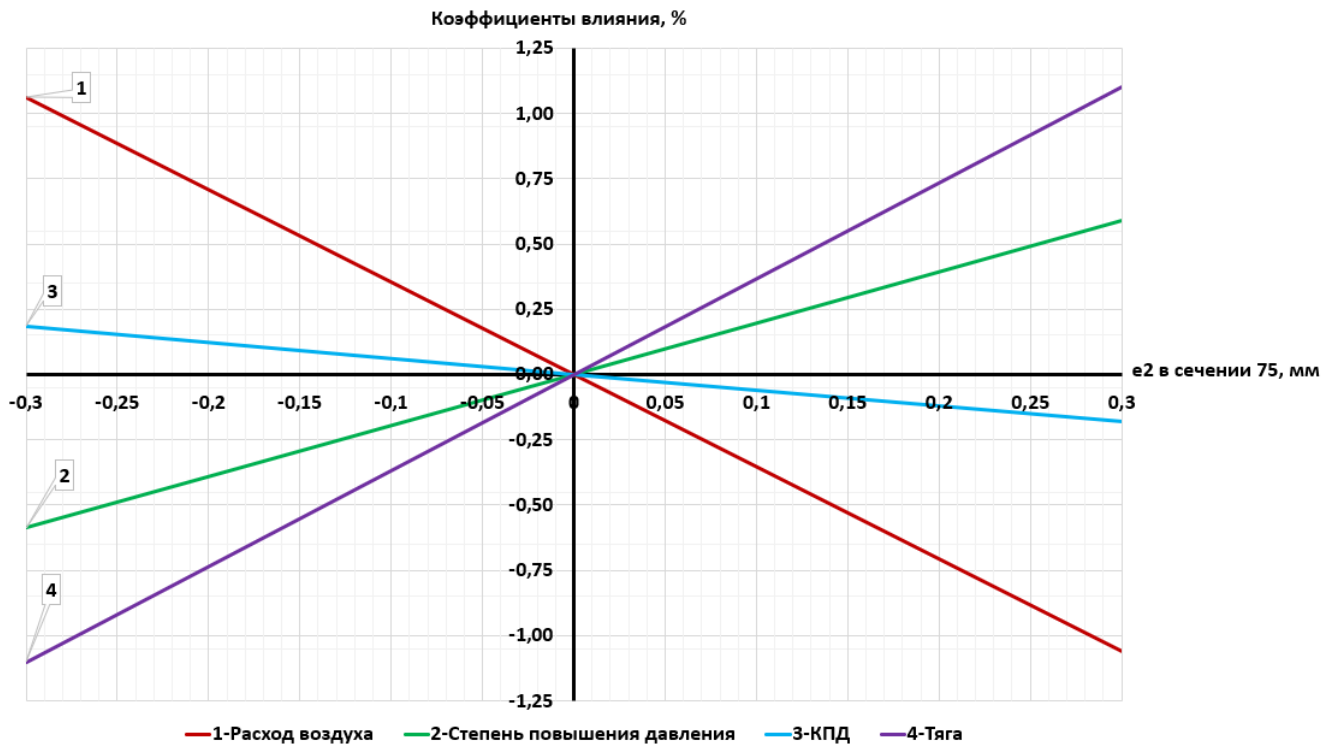


Рисунок Г.17 – График зависимости для моделей 17\_H\_min и 17\_H\_max

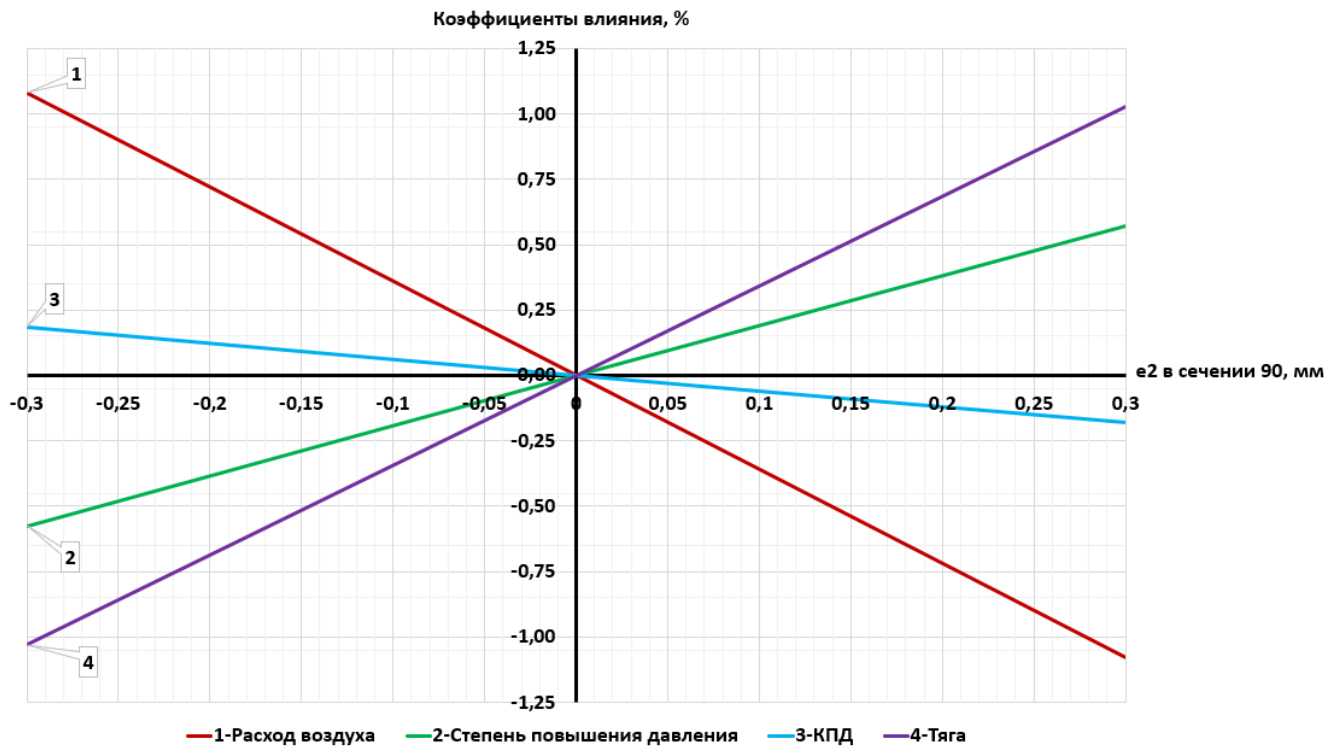


Рисунок Г.18 – График зависимости для моделей 18\_H\_min и 18\_H\_max