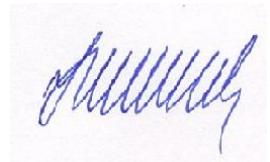


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ**  
**(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи



**Набиева Диана Гумяровна**

**ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ  
РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ**

*5.2.3 Региональная и отраслевая экономика  
(экономика промышленности)*

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук**

Научный руководитель  
доктор экономических наук,  
профессор Бурдина А.А.

Москва 2025

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	9
1.1 Сущность, особенности понятий критические и сквозные технологии .....	9
1.2 Анализ современного состояния и перспектив развития двигателестроения.....	26
1.3 Подходы к анализу полезности и рисков разработки и внедрения КС технологий.....	44
Выводы по 1 главе.....	52
ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ.....	54
2.1. Методический подход к оценке полезности разработки КС технологий в двигателестроении .....	54
2.3 Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении .....	86
2.4 Структура экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении .....	101
Выводы по 2 главе.....	108
ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ .....	111
3.1 Практическая реализация методического подхода к оценке полезности разработки КС технологий в двигателестроении .....	111
3.2 Практическая реализация методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении .....	128
Выводы по 3 главе.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	171

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы исследования.** Одной из основных целей развития российской авиационной промышленности (далее – АП), в частности двигателестроения является повышения уровня технологической независимости, укрепления технологического суверенитета особенно в секторе критических и сквозных (далее – КС) технологий. Достижение поставленной государством цели опосредуется решением задач в области разработки и внедрения новых технологий в двигателестроении; создания новых двигателей на основе цифровых аналогов, удовлетворяющих современным требованиям, создания стратегически значимых конструкционных материалов для авиа и двигателестроения, внедрения цифрового моделирования в процесс разработки, модернизации производственной базы. Реализация указанных задач требует адаптивности разработчиков, производителей высокотехнологичной продукции (далее – ВТП) авиастроения, двигателестроения к динамике рыночной конъюнктуры, изменениям предпочтений заказчиков авиационной техники (далее – АТ). Необходимо определять различные виды эффектов от разработки, реализации КС технологий для науки, продукции, предприятий изгтовителей, государства. Кроме того, необходимо учитывать эффективность разработки и реализации технологий с учетом комплексных рисков, включая финансовые, производственные и технологические АТ, предприятий изгтовителей и государства. Перечисленные обстоятельства обосновывают актуальность разработки экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы экономической оценки разработки и реализации технологий, эффективности НИОКР рассмотрены в трудах российских и зарубежных ученых Е.В. Григорьева, Н.А. Дубровского, И.Б. Ипатова, А.С. Карасева, Е.Т. Купрейшили, Е.Ю. Морозова, А.А. Румянцева и других авторов. Проблемы, механизмы, технологии управления процессами в организациях изучены исследователями М. Вебером, М. Портером, Ф. Тейлором, И. Фишером. Анализу проблем разработки высокотехнологичной продукции, модернизации, анализу рисков посвящены труды Г. Армстронга, А.Г. Бадаловой, Б. Банди, П.Г. Белова, Д.Б. Берга, Р.С. Голова, Д. Гэлаи, Ю.Я. Еленевой, А.Т. Зуб,

А.П. Ковалёва, Ф. Котлера, Н.Ш. Кремера, Р.А. Фатхутдинова и др. Однако вопросы комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий на примере двигателестроения, подготовки производства, оценки уровня технологической независимости требуют углубленного изучения в условиях цифровой среды.

**Объектом исследования** в диссертации являются предприятия двигателестроения, занимающиеся разработкой и реализацией критических и сквозных технологий.

**Предметом исследования** определен процесс оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении.

**Цель исследования** заключается в формировании структуры механизма комплексной оценки критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа рисков.

Достижение цели исследования требует решения поставленных задач, последовательно раскрывающих тему диссертации:

1. Провести анализ тенденций и особенностей развития двигателестроения в условиях цифровизации и необходимости укрепления экономического и технологического суверенитета России;

2. Обосновать методический подход к оценке полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении на основе анализа внутренних и внешних факторов риска;

3. Разработать методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении;

4. Предложить структуру экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска;

5. Выполнить апробацию экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве.

**Методология и методы исследования** обусловлены результатами актуальных научных работ отечественных и зарубежных исследователей в области оценки технологий, эффективности НИР и ОКР, производственного менеджмента,

анализа рисков при принятии решений. использованием теоретико-методологической базы системного, субъектно-ориентированного, процессного, ситуационного, ценностно-ориентированного подходов, статистического анализа а также теории вероятности, нейросетевого моделирования, институциональной экономической теории и теории рисков.

**Научная новизна диссертационной работы** состоит в теоретическом обосновании, формировании экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска.

В результате исследований получены следующие научные результаты, соответствующие критериям новизны:

1. Предложена классификация экономических параметров оценки критических и сквозных (далее КС) технологий в двигателестроении на основе анализа внутренних и внешних факторов риска производства АТ, отличающаяся выделением параметров полезности и рисков разработанной технологии для науки, ВТП, в которой используется технология, предприятий производителей, экономического и технологического развития смежных отраслей, технологического суверенитета государства.

2. Сформирован методический подход к оценке полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении на основе анализа внутренних и внешних факторов риска посредством нейросетевого моделирования, применение которого, в отличие от существующих подходов, позволяет дать оценку полезности с учётом рисков разработки КС технологии для науки и техники, для характеристик ВТП, где КС технологии используются.

3. Разработан методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении, отличительной особенностью которого является оценка влияния разработанной КС технологии на уровень технологической независимости государства, на характеристики АТ, обоснование целесообразности производства АТ с использованием разработанной технологии, временного, стоимостного фактора. Предложенный инструментарий позволяет оценить реализацию КС технологии с учётом обеспечения производственного, технологического суверенитета двигателестроения РФ в текущей и стратегической перспективе.

4. Предложен экономический механизм комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска, отличающийся возможностью принятия обоснованных решений по внедрению разработанных КС технологий в процесс производства ВТП авиационной промышленности с учётом требований к продукции на основе анализа изменения характеристик ВТП за счёт использования КС технологий, производственной, полигонной базы предприятий-изготовителей, уровня развития смежных отраслей, технологической независимости государства.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация экономических параметров оценки критических и сквозных технологий в двигателестроении.
2. Методический подход к оценке полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении.
3. Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении
4. Экономический механизм комплексной оценки разработки и реализации КС технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска.

**Степень достоверности результатов** достигается за счет изучения и анализа широкого перечня научных работ по теме исследования, использования репрезентативных данных; применения положений современных научных теорий и методов исследования в процессе подтверждения поставленной автором гипотезы; сопоставительного анализа полученных в исследовании теоретических выводов с результатами их практической апробации.

**Теоретическая и практическая значимость** обоснована тем, что научно-методический базис, теоретические концептуальные основы, методические подходы и выводы, содержащиеся в диссертации, могут быть использованы для совершенствования механизмов оценки эффективности НИОКР, стратегического управления, управления жизненным циклом АТ и эффективного внедрения новых технологий в других производственных отраслях современной экономики России, а также повышения эффективности их деятельности за счет внедрения комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в цифровом пространстве принятия решений. Практическая значимость

исследования подтверждается актами о внедрении на предприятиях: ОКБ им. А. Люльки-филиал ПАО «ОДК-УМПО», ОАО «ЛИИП им. Гризобудовой В.С.», АО «ЛИИ им. М.М. Громова».

**Личный вклад автора:** автором определены цели и задачи исследования, лично осуществлен подбор и анализ литературных источников, разработан методический подход к оценке разработки и инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий на примере двигателестроения, проведена их практическая реализация. Выполнен глубокий анализ, обработка и интерпретация полученных результатов, сформулированы выводы и написан текст диссертации. Основные результаты, изложенные в диссертационном исследовании получены соискателем лично или при его непосредственном участии, что подтверждается публикациями.

### **Апробация и внедрение результатов исследования.**

Основные научные результаты, полученные в диссертации, были представлены в виде докладов на научных конференциях, в том числе: «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2021г.), «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста» (г. Москва, 2021г.), «Королёвские чтения. XLVI Академические чтения по космонавтике» (г. Москва, 2022г.), «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2022г.), «Королёвские чтения. XLVII Академические чтения по космонавтике» (г. Москва, 2023г.), «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2023г.), «Управление и инновационное развитие предприятия: новые подходы и актуальные исследования (УИРП-2024)» (г. Москва, 2024г.).

Результаты диссертационного исследования также были представлены на XV Всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, ноябрь 2023 г.).

**Соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальности ВАК.** Профиль диссертации соответствует Паспорту специальности ВАК 5.2.3 – Региональная и отраслевая экономика в пп.: 2.2. Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях промышленности. 2.10. Промышленная политика. 2.16. Инструменты внутрифирменного и стратегического планирования на промышленных

предприятиях, отраслях и комплексах.

**Публикации по теме диссертации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 статьях, 5 из которых в рецензируемых научных изданиях из перечня, рекомендованного Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России, 1 статья опубликована в журнале, входящем в реферативную базу данных Scopus.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 138 наименований, и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 190 страницы машинописного текста, включая 61 рисунок и 30 таблиц.

# **ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

## **1.1 Сущность, особенности понятий критические и сквозные технологии**

Долгосрочные государственные программы развития различных отраслей промышленности, стратегии и прогнозы базируются на принципах устойчивого развития, заложенных в положениях указа Президента РФ [5]. Один из его пунктов гласит, что «...На современном этапе перехода к устойчивому развитию создаются рамочные условия, обеспечивающие возможность сопряженного, внутренне сбалансированного функционирования триады - природа, население, хозяйство». Процесс переход РФ к устойчивому развитию охватывает решение следующих трёх основных задач - экономических, социальных и экологических. Согласно действующему законодательству, повышение конкурентоспособности и структурная перестройка российской экономики требуют развития и создания высокотехнологичных производств и рынков при одновременной модернизации базовых отраслей таких как авиа и двигателестроения. Фундаментом стратегического роста и укрепления национальной безопасности признана технологическая перестройка системообразующих отраслей промышленности. Эти инициативы направлены на консолидацию научно-технического, производственного и ресурсного потенциала страны, насыщение внутреннего рынка отечественной продукцией и внедрением критических и сквозных технологий. В соответствии с нормативными правовыми документами, к тактическим и стратегическим целям экономической безопасности России относятся укрепление экономического и технологического суверенитета, повышение конкурентоспособности и устойчивости экономики к внешним и внутренним рискам, а также достижение устойчивых темпов роста в авиастроении, двигателестроении, машиностроении [9].

Анализ показывает, что основой достижения целей обеспечения экономической безопасности РФ, является технологическая независимость,

разработка новых технологий. В документах определены задачи достижения целей обеспечения экономической безопасности РФ (таблица 1.1.)

Таблица 1.1 – Основные задачи обеспечения экономической безопасности РФ

<b>Задачи для достижения целей обеспечения экономической безопасности РФ</b>
структурная перестройка национальной экономики на технологической основе
стимулирование использования внутренних источников инвестиций, ускорение темпов прироста инвестиций в основной капитал, доступность долгосрочного кредитования
разработка и внедрение КС технологий , технологий ИИ, создание высокотехнологичных производств, новых экономических направлений
создание высокотехнологичных рабочих мест
локализация высокотехнологичного производства на территории РФ, разработка и внедрение российских технологических разработок
технологическое обновление производственной базы машиностроения, авиа-, двигателестроения; повышение темпов развития
развитие реального сектора экономики, в приоритете: авиационной, судостроительной, ракетно-космической промышленности, двигателестроения

*Источник: составлено автором по данным [9, 20, 21]*

Анализ нормативной правовой базы приведённый в таблице 1.1 демонстрирует, что для эффективного управления и контроля перехода государства и бизнеса на принципы устойчивого развития требуется внедрение системы конкретных целевых показателей. В экономическом сегменте на макроуровне таким ориентиром может выступать «уровень удельного потребления энергоресурсов и иных ресурсов в расчёте на душу населения и на единицу ВВП».

В социальной сфере индикатором качества жизни традиционно считается доход, измеряемый через показатель ВВП на душу населения, который одновременно отражает и динамику экономического развития государства. При этом рост ВВП непосредственно обусловлен состоянием и взаимодействием различных видов потенциала — производственного, трудового, научно-технического и иных, составляющих основу и вектор развития. Содержание и интерпретация самого понятия «развитие» широко варьируются в зависимости от научной дисциплины и контекста. Лешкевич Т.Г., Прохоров А.М. и Мацова А.С. в общем определяют развитие как «необратимые, направленные, качественные изменения» [51, 57, 91]. М.С. Артёменко в ходе исследований, изложенных в монографии «Экономическая стабилизация как условие устойчивого развития страны» поднимаются вопросы устойчивого социально-экономического развития с

точки зрения макроэкономической стабилизации. Он выделяет "стабильность" в качестве основного критерия устойчивости. Стабилизация макроэкономического развития в работе трактуется как «...постоянный экономический рост, достижение полной занятости, отсутствие инфляции и внешнеэкономическое равновесие» [35]. Описываются закономерности развития как «...способы выражения устойчивых связей и отношений между объектами и явлениями, а также динамику структуры любой экономической системы. Законы строения описывают связи между элементами предприятия и условия, обеспечивающие целостность его структуры и относительную устойчивость в условиях постоянных изменений. Законы динамики, в свою очередь, характеризуют последовательность изменений и их скорость» [44]. Булава И.В. определяет законы развития как «...способы отражения устойчивых связей и взаимодействий между объектами и явлениями, а также стабильности структуры любой экономической системы. Законы строения описывают взаимосвязи элементов предприятия и условия сохранения целостности его структуры и относительной устойчивости в условиях непрерывных изменений. Законы динамики характеризуют последовательность этих изменений и их скорость» [39].

Понятия «развитие», «рост» и «динамика» тесно взаимосвязаны между собой. В работах Старовойтова М.К. отмечается, что крупные организации, будучи системами более сложными, обладают динамичной структурной устойчивостью, сохраняемой непрерывной модификацией составляющих элементов» [66]. Таким образом, устойчивое функционирование и развитие предприятия анализируется и характеризуется в динамике, поскольку именно динамика отражает организационно-экономические изменения в деятельности предприятия.

Существуют различные взгляды на устойчивое развитие. Общий подход можно увидеть в работе Батырмураевой З.М. «...условия при которых имеют место прогрессивные изменения, движение экономики по пути развития под действием определенных факторов» [120] и в работе Исакова Н. «...это новая опережающая и корректирующая настоящую модель взаимодействия людей с природой и друг с другом, новый образ жизни, мышления и культуры. Это сложный

системный процесс планирования и управления международным сообществом, предполагающий равноправное партнерство стран, государственных, общественных и деловых кругов, новая система учета, оценки и стимулирования социально-экономического поведения людей, новые правовые, нравственные и мировоззренческие ориентиры» [48]. Разработка КС технологий, цифровизация и внедрение ИИ в экономические процессы рассматриваются исследователями как инструменты обновления производства в системообразующих отраслях, повышения технологической трансформации и независимости. [5, 22, 29, 30].

Бобылев С.Н. отмечает, что «... необходима выработка устойчивых моделей производства и потребления, которые позволяют обеспечить стабильный рост экономики и снимать все угрозы» [73].

В системе долгосрочного планирования будущее предсказывается путем экстраполяции сложившихся структурных пропорций и тенденций. В системе стратегического планирования идут от будущего к настоящему, используя анализ перспектив предприятия. Вся деятельность предприятия должна быть ориентирована на достижение целевых показателей, для чего важно использовать современные принципы планирования и управления. Основным принципом обеспечения устойчивого развития является применение методов стратегического управления предприятием. Долгосрочная стратегия должна своевременно отслеживать и реагировать на внезапные и часто возникающие изменения в окружающей среде. Применение методов диагностики хозяйственной деятельности на постоянной основе позволяет оценить уровень устойчивого развития, скорректировать текущую стратегию или разработать принципиально новую.

По мнению Науменко Е.Е., устойчивое развитие следует понимать, как «...стабильное, управляемое развитие, в ходе которого открываются новые перспективные возможности для позитивных изменений». Он выделяет несколько форм развития: реакционное, инновационное, активное и пассивное [125]. Для оперативного реагирования на внутренние и внешние изменения Науменко Е.Е. предлагает использовать «...экономический механизм формирования системы

управления устойчивым развитием предприятия», сосредоточенный на выявлении и использовании экономических точек роста, способствующих дальнейшему прогрессу организации. Предложенная модель гармонично вписывается в общие подходы к формированию стратегии развития предприятия, расширяя их за счёт дополнительного подготовительного этапа — выделения ключевых точек экономического роста, которые обеспечивают более эффективное планирование и реализацию мероприятий по развитию.

Проведён анализ нормативных правовых документов, регламентирующих процесс развития системообразующих отраслей промышленности, в частности, двигателестроения (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Нормативная правовая база, регламентирующая процесс развития системообразующих отраслей промышленности РФ

Регламентирующий документ	Ключевые аспекты, обосновывающие актуальность исследования
«Стратегия национальной безопасности РФ» - Указ Президента РФ № 400 от 02.07.2021	«... стратегия основана на взаимосвязи и взаимозависимости национальной безопасности Российской Федерации и социально-экономического развития страны.» «... важнейшими инновационными проектами государственного значения являются комплекс взаимосвязанных по ресурсам, исполнителям и срокам мероприятий, направленных на достижение необходимого уровня национальной безопасности и получение экономического эффекта, значимого для экономики в целом или крупных её секторов.»[9].
«Концепция технологического развития на период до 2030 года» - Распоряжение Правительства РФ N 1315-р от 20.05.2023	«... определены три ключевые цели технологического развития: обеспечение национального контроля над воспроизводством критических и сквозных технологий; переход к инновационно ориентированному экономическому росту, усиление роли технологий как фактора развития экономики и социальной сферы; технологическое обеспечение устойчивого функционирования и развития производственных систем.» [20]
«Комплексная программа развития авиационной отрасли РФ до 2030 года», № 1693-р от 25.07.2022	«... Программа является документом отраслевого планирования, синхронизированным с иными программными документами Российской Федерации, направленным на создание регулирующих, инвестиционных, инфраструктурных и технологических условий для устойчивого развития авиационной отрасли Российской Федерации.» [19]
«Об утверждении госпрограммы «Научно-технологическое развитие РФ» - Постановление Правительства РФ № 377 от 29.03.2019 г.	«... Государственная программа Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» является основным инструментом реализации государственной политики Российской Федерации в области научно-технологического развития на период до 2030 года.» «... Программа направлена на создание условий для достижения Российской Федерацией технологического суверенитета, обеспечения конкурентоспособности экономики и повышения качества жизни населения» [16].
«О развитии искусственного интеллекта в РФ» - Указ президента РФ №490 от 10.10.2019	«... Развитие искусственного интеллекта является одним из приоритетных направлений научно-технологического развития Российской Федерации.» «... Создание и внедрение технологий искусственного интеллекта способствует повышению технологической независимости и конкурентоспособности отечественной экономики» [8].
Указ президента «Стратегия НТР России» № 642 от 01.12.2016	«... переориентация на передовые цифровые и интеллектуальные технологии производства, использование роботизированных систем; переход к использованию новых материалов и методов проектирования» [7].

Таблица 1.2 – Нормативная правовая база, регламентирующая процесс развития системообразующих отраслей промышленности РФ (продолжение)

<p><b>«Транспортная стратегия РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» № 3363-р от 27.11.2021</b></p>	<p>«... Одной из целей стратегического планирования в транспортной области является цифровая трансформация отраслей и ускоренное внедрение новых технологий. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: Оцифровка ЖЦ инфраструктуры и процессов управления транспортным комплексом; Повышение уровня технологического развития транспортных систем» [18].</p>
<p><b>«Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы» от 16.03.2020 № 287</b></p>	<p>«... Цель направления исследований - разработка технологий получения и контроля качества конструкционных и функциональных материалов, что укрепит производственную безопасность РФ роста конкурентоспособности продукции. Главные направления исследований: разработка инновационных конструкционных материалов для машино- и судостроения, авиационной и космической техники; создание новых материалов с уникальными функциональными свойствами, среди которых сплавы, композиты, магнитные материалы, полупроводники, сверхпроводники для укрепления отечественной элементной базы» [31].</p>
<p><b>Постановление Правительства РФ "Об утверждении государственной программы РФ "Развитие авиационной промышленности" от 15.04.2014 N 303(ред. от 22.11.2022)</b></p>	<p>«... Основными целями государственной политики в сфере реализации Программы являются: повышение уровня транспортной доступности и связанности территорий РФ; удовлетворение потребностей внутрироссийских перевозок за счет авиационной техники российского производства с достижением к 2030 году долей самолетов и вертолетов российского производства в парке крупнейших российских авиаперевозчиков не менее 50 процентов и 90 процентов соответственно» [14].</p>
<p><b>Постановление Правительства РФ "Об утверждении Правил определения показателей эффективности мер и инструментов государственной политики в области научно-технологического развития РФ " от 28.04.2025 N571</b></p>	<p>«... Показатели эффективности мер и инструментов государственной политики в области научно-технологического развития РФ направлены на достижение: цели научно-технологического развития РФ прогресса в реализации приоритетов научно-технологического развития» [17].</p>

Таблица 1.2 – Нормативная правовая база, регламентирующая процесс развития системообразующих отраслей промышленности РФ (продолжение)

<p><b>Постановление Правительства РФ "Об организации проектной деятельности в Правительстве</b></p>	<p>«... Анализ реализации проектов осуществляется с использованием системы "Управление", которой обеспечивается:</p>
---	--

<p><b>РФ " (вместе с "Положением об организации проектной деятельности в Правительстве РФ ")</b> от 31.10.2018 N 1288 (ред. от 21.02.2025)</p>	<p>оценка достаточности, обоснованности (документальной подтвержденности), актуальности, полноты и корректности информации и данных о реализации проектов; оценка эффективности реализации проектов, в том числе достижения общественно результатов (для национальных проектов и федеральных проектов, входящих в состав национальных проектов), выполнения задач, показателей, мероприятий (результатов), контрольных точек проектов; оценка факторов, рисков и прогнозирование хода реализации проектов» [15].</p>
<p><b>Приказ Минэкономразвития России "Об утверждении методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции" от 10.04.2025 N 222</b></p>	<p>В Приказе регламентирован «... метод расчета уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции» [28].</p>
<p><b>Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» (вместе с «Концепцией технологического развития на период до 2030 года») от 20.05.2023 N 1315-</b></p>	<p>В Распоряжении приведены «...этапы технологического развития: Первый этап (90-е годы) - дезинтеграция и выживание научно-технологической системы. Второй этап (с середины 2000-х годов по настоящее время) - встраивание в глобальное научное пространство и глобальные производственно-технологические цепочки»[20]. В Распоряжении приведены «... источники формирования технологических приоритетов» [20].</p>
<p><b>Указ Президента РФ "О Стратегии научно-технологического развития РФ "</b> от 28.02.2024 N 145</p>	<p>Приоритеты и перспективы научно-технологического развития: «... переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта» [10].</p>

Таблица 1.2 – Нормативная правовая база, регламентирующая процесс развития системообразующих отраслей промышленности РФ (продолжение)

<p><b>Федеральный закон "О технологической политике в РФ и о внесении изменений в отдельные законодательные</b></p>	<p>«... Цели технологической политики: - обеспечение технологического лидерства РФ - обеспечение конкурентоспособности высокотехнологичной продукции, созданной на основе отечественных технологий, и эффективности ее создания за счет внедрения технологических инноваций;</p>
---	--

<b>акты РФ</b> " от 28.12.2024 N 523-ФЗ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- создание условий для экономического развития и обеспечения конкуренции в сфере технологического развития.</li> </ul> <p>Задачами технологической политики являются:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- внедрение российскими юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями критических и сквозных технологий на основе собственных линий разработки технологий;</li> <li>- создание различных видов высокотехнологичной продукции и выведение ее на рынок для обеспечения технологического лидерства РФ;</li> <li>- формирование долгосрочных спроса и предложения в отношении высокотехнологичной продукции, создаваемой для обеспечения технологического лидерства РФ » [3].</li> </ul>
---	--

*Источник: составлено автором по данным [3, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 28, 31]*

Анализ документов показывает, что в условиях перехода мировой экономики на новую технологическую основу лидерство в развитии науки и технологий становится одним из ключевых факторов повышения конкурентоспособности предприятий и отраслей промышленности. Ускорение научно-технического прогресса затрагивает все сферы жизни человека и сказывается на качестве этих сфер. Технологические изменения увеличивают значение инноваций для достижения высоких темпов социально-экономического развития и для эффективного управления как на государственном, так и на корпоративном уровнях. Возникают новые профессии и растут требования к уровню образования и квалификации работников. Межгосударственная конкуренция за привлечение ученых и высококвалифицированных специалистов усиливается. Появление новых технологий приводит к созданию передового вооружения, военной и специальной техники, а также систем обеспечения безопасности с ранее недостижимыми характеристиками. Это силовое соперничество между странами переносится в новые сферы.

В Концепции технологического развития на период до 2030 года под инновационно-ориентированным экономическим ростом понимается модель социально-экономического развития, базирующаяся преимущественно на внедрении КС технологий и технологических инноваций. Данная модель развития подразумевает эффекты от применения технологий. К таким эффектам (полезностям) относятся: повышение технологической независимости отраслей промышленности, рост капитализации предприятий, повышение их технологического развития, конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках. [20].

В рамках Концепции закреплено определение инновационного проекта как совокупности мероприятий, направленных на достижение экономического эффекта посредством реализации инноваций, включая процессы коммерциализации научных и (или) научно-технических результатов [3, 7, 20, 28]. Особое место занимает категория наилучшей доступной технологии, под которой понимается технология производства продукции, выполнения работ или оказания

услуг, основанная на современных достижениях науки и техники и обеспечивающая оптимальное сочетание экологических критериев с возможностями практического применения.

В Концепции выделяются «проекты-маяки», ориентированные на создание новых или прототипных рынков за счёт формирования спроса и предложения высокотехнологичной продукции. Реализация подобных проектов предполагает внедрение новых норм регулирования, апробацию инновационных бизнес-моделей. В числе приоритетных направлений выделяются проекты по развитию беспилотных грузовых перевозок в авиационной, автомобильной и водной средах, медицинских технологий, основанных на обработке больших данных, а также электротранспорта.

Кроме того, ключевым инструментом достижения технологической независимости выступают *проекты технологического суверенитета*. Они охватывают полный инновационный цикл создания высокотехнологичной продукции на базе собственных разработок, с использованием критических и сквозных технологий. Такие проекты предусматривают не только реализацию технологических этапов, но и решение кадровых, организационных и регуляторных задач [3, 7, 15, 20, 28].

Федеральным законом № 523-ФЗ о технологической политике в РФ введены понятия критических и сквозных (КС) технологий. В нормативных правовых документах делается акцент на том, чтобы разработка и внедрение КС технологий способствовали развитию двигателестроения и авиационной отрасли как системообразующих. [3]. Под критической технологией понимается наукоемкая технология, необходимая для создания высокотехнологичной продукции, имеющая системное значение для функционирования экономики, обеспечения безопасности государства. [3]. В соответствии с законом, сквозная технология это перспективная наукоемкая технология межотраслевого значения, обеспечивающая создание высокотехнологичной продукции или внедрение технологических инноваций, оказывающая существенное влияние на экономическое развитие путем изменения существующих или формирование новых рынков [3].

Для поддержания технологического суверенитета РФ, ставится задача создания собственной линии разработки технологий как комплекса мероприятий (проектов, программ) и условий (в том числе наличие кадрового потенциала, результатов исследований и разработок, технической документации, программ для ЭВМ, прав на результаты интеллектуальной деятельности, основных средств и иного имущества), реализация и выполнение которых обеспечивают создание и устойчивое развитие отечественных технологий и продуктов на их основе, включая разработку их новых поколений, на территории РФ или в случаях, установленных Правительством РФ, за ее пределами с сохранением контроля РФ или российских юридических лиц (национальный контроль) [11, 27].

Под технологическими инновациями понимается новый или усовершенствованный продукт, способ или процесс производства (реализации) товаров, выполнения работ, оказания услуг, создания охраняемых результатов интеллектуальной деятельности, введенные в употребление и способствующие формированию новых рынков, повышению производительности труда, повышению технико-экономических показателей производимой продукции. В соответствии с законом технологическое лидерство РФ – технологическая независимость РФ, выражаясь в разработке отечественных технологий и создании продукции с использованием таких технологий с сохранением национального контроля над критическими и сквозными технологиями на основе собственных линий разработки технологий в целях экспорта конкурентоспособной высокотехнологичной продукции и замещения ею на внутреннем рынке продукции, создаваемой на базе устаревших иностранных технологий, а также превосходство таких технологий и продукции над зарубежными аналогами (таблица 1.3) [3, 52].

Таблица 1.3 – Цели, задачи и инструменты реализации технологической политики

<b>Цели технологической политики</b>	<b>Задача технологической политики</b>	<b>Инструменты реализации технологической политики</b>
1) достижение технологического	1) внедрение российскими юрлицами и ИП критических и сквозных технологий на основе	1) среднесрочные и долгосрочные планы развития технологий; 2) перечни критических и сквозных

<p>лидерства России на мировой арене;</p> <p>2) повышение конкурентоспособности продукции;</p> <p>3) ускоренное внедрение инноваций;</p> <p>4) создание условий для экономического роста и развития конкуренции в технологической сфере.</p>	<p>собственных линий разработки технологий;</p> <p>2) создание различных видов высокотехнологичной продукции и выведение ее на рынок для обеспечения технологического лидерства РФ;</p> <p>3) формирование долгосрочных спроса и предложения в отношении высокотехнологичной продукции, создаваемой для обеспечения технологического лидерства;</p> <p>4) создание благоприятных условий (правовых, экономических, организационных и иных) для осуществления деятельности по реализации технологической политики;</p> <p>5) создание и развитие инфраструктуры развития технологий, в том числе для подготовки квалифицированных специалистов;</p> <p>6) осуществление мониторинга эффективности технологической политики и оценка эффективности мер государственного стимулирования;</p>	<p>технологий;</p> <p>3) методики оценки уровней готовности технологий, производства, определения уровня рыночной готовности и коммерциализации высокотехнологичной продукции;</p> <p>4) программы инновационного развития организаций с государственным участием;</p> <p>5) стимулирование спроса и предложения в отношении высокотехнологичной продукции, внедрения критических и сквозных технологий на основе собственных линий разработки;</p> <p>6) создание и обеспечение функционирования инфраструктуры развития технологий;</p> <p>7) проекты по развитию сквозных технологий;</p> <p>8) национальные проекты по обеспечению технологического лидерства РФ, иные национальные проекты, государственные программы РФ и государственные программы субъектов РФ, направленные на экономическое развитие на основе отечественных технологий, и структурные элементы указанных проектов и программ;</p>
--	---	--

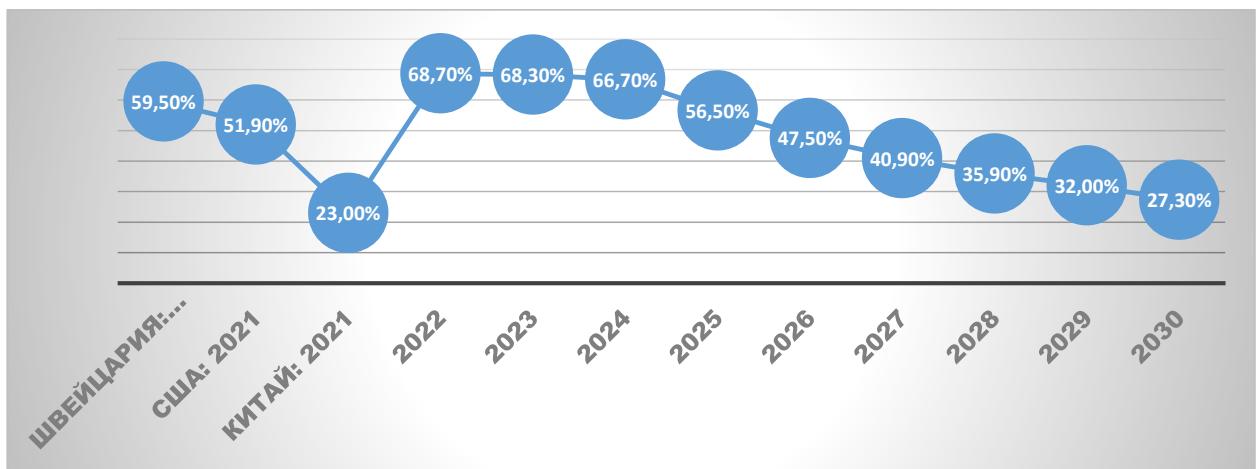
*Источник: составлено автором по данным [3, 52, 118]*

Для достижения указанных целей технологической политики определяются целевые показатели обеспечения технологического лидерства РФ. В законе говорится о необходимости разработки методик оценки разработки и реализации КС технологий, уровней готовности технологий, оценки уровней готовности производства, определения уровня рыночной готовности и коммерциализации высокотехнологичной продукции. Важным аспектом научно-технологического развития является оценка результативности финансирования инновационных проектов с учётом права на обоснованный риск. Под ним понимается допустимость того, что агент или получатель средств может не достичь запланированных

характеристик и эффектов, а вложенные ресурсы — частично обесцениться из-за специфики высокорисковой инновационной деятельности. Таким образом, необходимо признавать существование факторов неопределённости (рисков) исследований и разработок при создании КС технологий, то есть отрицательный результат также является частью процесса. Целесообразно при оценке полезности КС технологий формировать инструменты управления технологическими рисками [12,13].

Вторая цель связана с переходом к инновационно-ориентированному экономическому росту и усилением влияния технологий как ключевого фактора развития экономики и социальной сферы.

Третья цель - технологическое обеспечение устойчивого функционирования и развития производственных систем. Планируемые критериальные показатели представлены на рисунках 1.1.-1.5 [20].



*Источник: составлено автором по данным [20]*

Рисунок 1.1 – Динамика коэффициента технологической зависимости

Прогнозируется снижение коэффициента технологической зависимости с 56,5% в 2025 году до 27,3% в 2030 году, в частности, за счёт разработки и внедрения КС технологий в системно значимых отраслях промышленности.

Кроме того, снижение коэффициента технологической зависимости опосредуется ростом затрат на исследования и разработки до 146,3% в 2030 к

уровню 2022 года. Данный фактор должен явиться основой технологического рывка в авиа, двигателестроении.

В России прогнозируется рост удельного веса уровня инновационной активности с 13,9% в 2025 году до 27% в 2030. Вместе с тем, планируется рост удельного веса инновационных товаров, работ, услуг в общем объёме с 5,8% в 2025 до 8% в 2030 году.

По прогнозам Правительства, к 2030 году расходы на инновационную деятельность увеличатся почти в 2,3 раза по сравнению с уровнем 2022 года (228,3%). Данное обстоятельство приведёт к увеличению доли инновационной продукции, работ и услуг в совокупном объёме производства и реализации.



*Источник: составлено автором по данным [20]*

Рисунок 1.2 – Динамика коэффициента технологической зависимости и темпа роста затрат на исследования и разработки



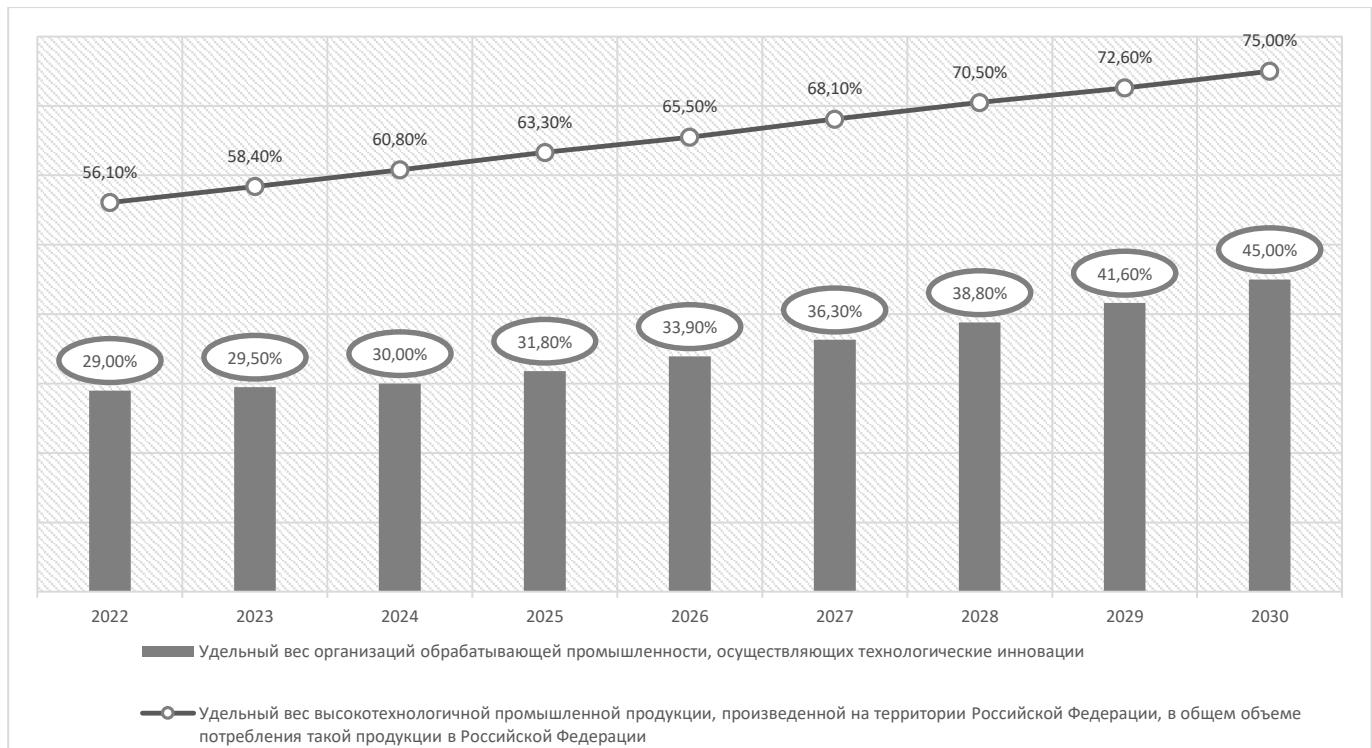
*Источник: составлено автором по данным [20]*

Рисунок 1.3 – Удельный вес инновационных товаров и уровень инновационной активности организаций



*Источник: составлено автором по данным [20]*

Рисунок 1.4 – Темп роста затрат на инновационную деятельность, объема товаров малых технологичных компаний



*Источник: составлено автором по данным [20]*

Рисунок 1.5 – Удельный вес организаций обрабатывающей промышленности, осуществляющих технологические инновации и высокотехнологичной продукции

Кроме того, фактором роста удельного веса инновационных товаров, высокотехнологичной продукции, работ, услуг, произведённых в РФ в общем объёме выполненных работ и услуг в 2030 году будет являться рост числа организаций обрабатывающей промышленности, осуществляющих технологические инновации и выпускающих высокотехнологичную продукцию с 63% в 2025 г до 75% в 2030 г [47, 102].

В соответствии с Концепцией технологического развития на период до 2030 года перечень сквозных технологий включает следующие технологические направления (см таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Направления сквозных технологий

Технологии обработки и передачи данных	Технологии в сфере энергетики	Новые производственные технологии
<ul style="list-style-type: none"> <li>• технологии ИИ, в том числе машинное обучение, когнитивные системы и интеллектуальную аналитику;</li> <li>• технологии хранения, обработки и анализа больших массивов данных;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• технологии передачи электроэнергии и формирования распределённых</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• технологии создания компонентов для робототехники и</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• распределённые реестры и блокчейн;</li> <li>• нейротехнологии, а также виртуальная и дополненная реальности;</li> <li>• квантовые вычислительные системы и квантовое моделирование;</li> <li>• квантовые коммуникации и защищённая передача данных;</li> <li>• инновационное промышленное программное обеспечение и универсальные системные платформы;</li> <li>• геоинформационные системы и пространственные данные;</li> <li>• технологии доверенного цифрового взаимодействия и кибербезопасности;</li> <li>• современные и перспективные сети мобильной связи (включая 5G и последующие поколения).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>интеллектуальных энергосетей;</li> <li>• современные системы аккумулирования энергии;</li> <li>• развитие водородной энергетики и соответствующей инфраструктуры.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>мехатронных систем;</li> <li>• сенсорные технологии и интеллектуальные системы измерения;</li> <li>• микроэлектроника и фотоника, включая разработку элементной базы нового поколения;</li> <li>• разработка и моделирование новых материалов и веществ с заданными свойствами.</li> </ul>
--	---	---

Источник: составлено автором по данным [20]

Распоряжением Правительства РФ от 25.06.2022 N 1693-р (ред. от 04.05.2024) утверждена комплексная программа развития авиационной отрасли РФ до 2030 года, которая разработана в соответствии с Федеральным законом "О стратегическом планировании в РФ". В данной программе выделены КС технологии в области авиа и двигателестроения [19].

## **1.2 Анализ современного состояния и перспектив развития двигателестроения**

Основой обеспечения технологической независимости страны является создание критических и сквозных технологий, сокращение времени разработок и подготовки производства, прогнозирование, повышение скорости реагирования на требования к характеристикам продукции. Производимая авиационная техника должна иметь конкурентные преимущества в текущем и долгосрочном периоде для решения тактических и стратегических задач. В соответствии с этим, в исследовании выдвигается гипотеза о необходимости создания методического инструментария оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в отрасли двигателестроения. В соответствии с приказом

Минэкономразвития России от 10.04.2025 N 222 "Об утверждении методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции" уровень технологической независимости высокотехнологичной продукции – это показатель, характеризующий степень соответствия уровней готовности технологий и уровней готовности производства высокотехнологичных продуктов, критичных элементов, комплектующих и материалов целевым значениям в рамках номенклатуры высокотехнологичных продуктов. Дополнительно при принятии решения о критичности следует учитывать следующие факторы: достигнутый уровень технологического суверенитета по видам продукции; достигнутый уровень развития критических и сквозных технологий [28].

Развитие авиастроения и двигателестроения с точки зрения технологических укладов представляет собой важнейшую стратегическую задачу для авиационного сектора экономики России. По мнению ученых, Россия отстает от ведущих стран мира в экономической области [40, 103]. Это отставание в высокотехнологической сфере объясняется несколькими факторами. Во-первых, финансирование фундаментальных исследований осуществляется наряду с общегосударственными приоритетами, в то время как прикладные исследования финансируются из раздела «Национальная экономика». Во-вторых, практически отсутствует частное финансирование научных исследований. Разграничение фундаментальной и прикладной науки при распределении бюджетных средств указывает на низкую эффективность научной деятельности и противоречит принципу интеграции всех стадий технологического цикла. Ведущими странами в разработке ключевых технологий и развитии высокотехнологичной производственной базы являются США, Япония, Швеция, Китай и другие, достигшие значительных успехов в некоторых областях индустрии 6.0 [60].

Основные характеристики развития КС технологий представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Основные характеристики развития КС технологий

«... Циклы экономики	страны-лидеры	США, Япония, ЕС, Китай, Юго- Восточная Азия, Россия, Индия, Бразилия
	характеристика цикла	Нанотехнологическая и биотехнологическая революции, стремительное развитие когнитивной науки
Универсальный ресурс		Нано-электро-механические системы, биопроцессоры, устройства с прямым доступом к нейронам
Инфраструктура	транспорт и связь	Интегрированные информационные системы и телекоммуникации, мобильный Интернет, широкополосный доступ
	энергия	Водородная и термоядерная энергия
Состояние науки и образования		Конвергенция NBIC-технологий, глобальный рынок услуг, сетевые научно-исследовательские и инновационные системы
Преобладающие технологии		Нано- и биотехнологии, генная инженерия, мембранные и квантовые технологии, фотоника, микро (nano)-механика, термоядерная энергетика, искусственный интеллект»

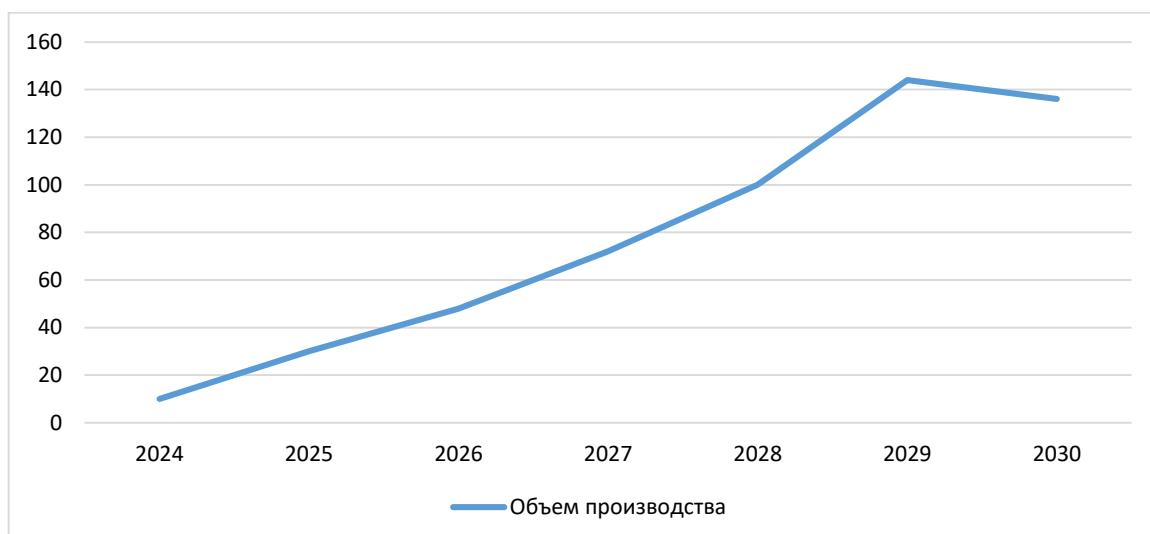
*Источник: составлено автором по данным [20,28]*

Двигателестроение в настоящее время является востребованным, высокотехнологичным и перспективным направлением в проектировании и разработке АТ, обеспечивающим тактическое и стратегическое преимущество авиастроительной отрасли [46]. Проведен анализ текущего состояния и перспектив дальнейшего развития этой подотрасли. Наблюдается положительные прогнозный тренд в развитии двигателестроения. Планируемая динамика производства перспективного двигателя-8 (ПД-8), (ПД-14), ВК-1600В (см. рисунки 1.6 – 1.8). Финансовые показатели федеральной программы «Авиационное двигателестроение» и программы «Развитие авиационной промышленности» представлены на графиках (см. рисунки 1.9 – 1.10) [14,19]



*Источник: составлено автором по данным [14,19]*

Рисунок 1.6 – График производства двигателя-8 (ПД-8) по годам



*Источник: составлено автором по данным [14,19]*

Рисунок 1.7 – График производства двигателя-14 (ПД-14) по годам

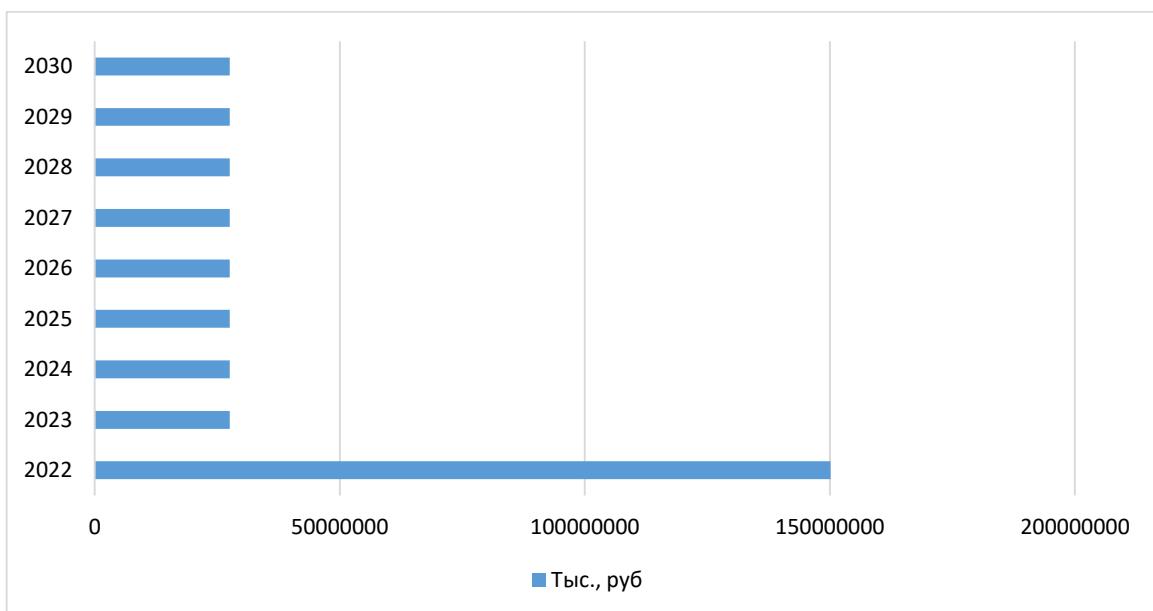
Планируется рост производства перспективных двигателей ПД-8 и ПД-14 к 2030 году.



*Источник: составлено автором по данным [14,19]*

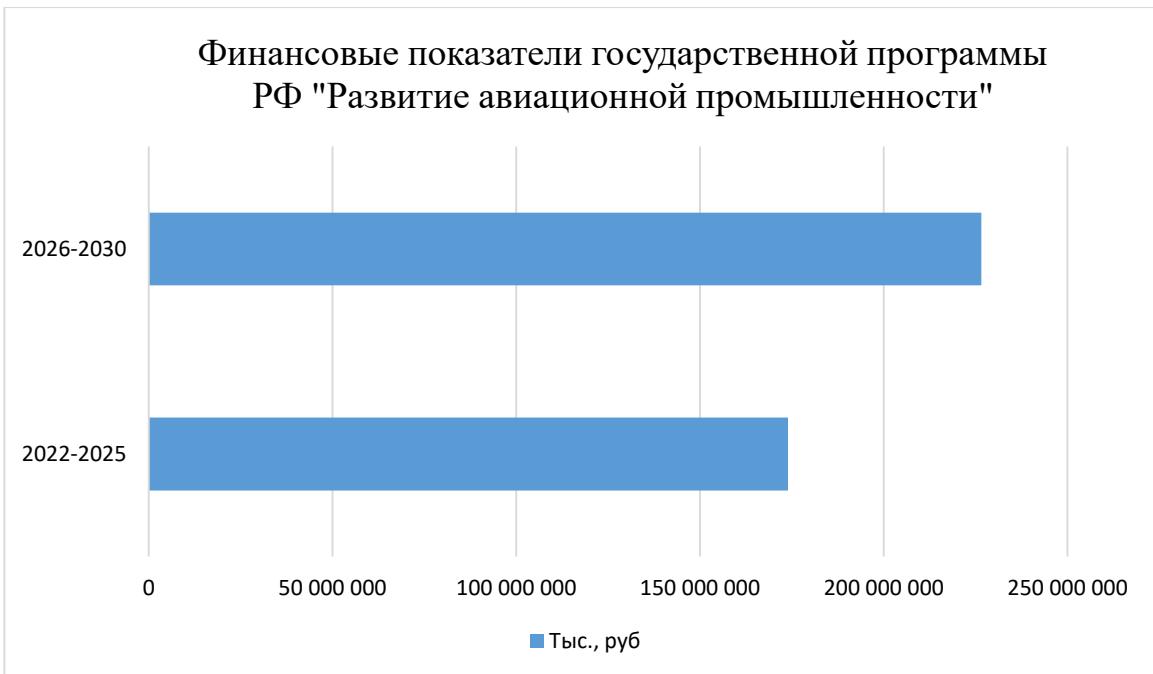
Рисунок 1.8 – График производства ВК-1600В по годам

Наряду с этим, планируется рост производства ВК-1600В к 2028 году.



*Источник: составлено автором по данным [14,19]*

Рисунок 1.9 – Финансовые показатели федеральной программы "Авиационное двигателестроение"



*Источник: составлено автором по данным [14, 19]*

Рисунок 1.10 – Финансовые показатели федеральной программы «Развитие авиационной промышленности»

Анализ планируемого финансирования по федеральной программе "Авиационное двигателестроение" и "Развитие авиационной промышленности" свидетельствует о росте государственных инвестиций в отрасль. Изучены особенности современных технологий в двигателестроении [104, 127, 130]. Принципиальная сложность разработки многорежимных двигателей для сверхзвуковых самолетов обусловлена принципиальной противоположностью требований к их работе на различных режимах. Для сверхзвуковых скоростей важны высокая удельная и максимальная тяга, что предполагает относительно низкую степень двухконтурности. Для крейсерских полетов на дозвуковой скорости требуются более низкая потребная тяга и уменьшенная удельная тяга с целью повышения полетного КПД двигателя, что, в свою очередь, требует увеличенной степени двухконтурности [62, 82]. (Приложение А)

В газотурбинных двигателях традиционных схем указанное противоречие решается выбором компромиссных расчётных параметров двигателя с учетом назначения летательного аппарата. Альтернативным подходом выступают двигатели с изменяемым рабочим процессом (ДИП), обеспечивающие

возможность независимого регулирования ключевых параметров цикла. Это позволяет одновременно достигать высокой тяги на сверхзвуковых режимах и высокой экономичности при крейсерских полетах на дозвуковых скоростях [62, 95].

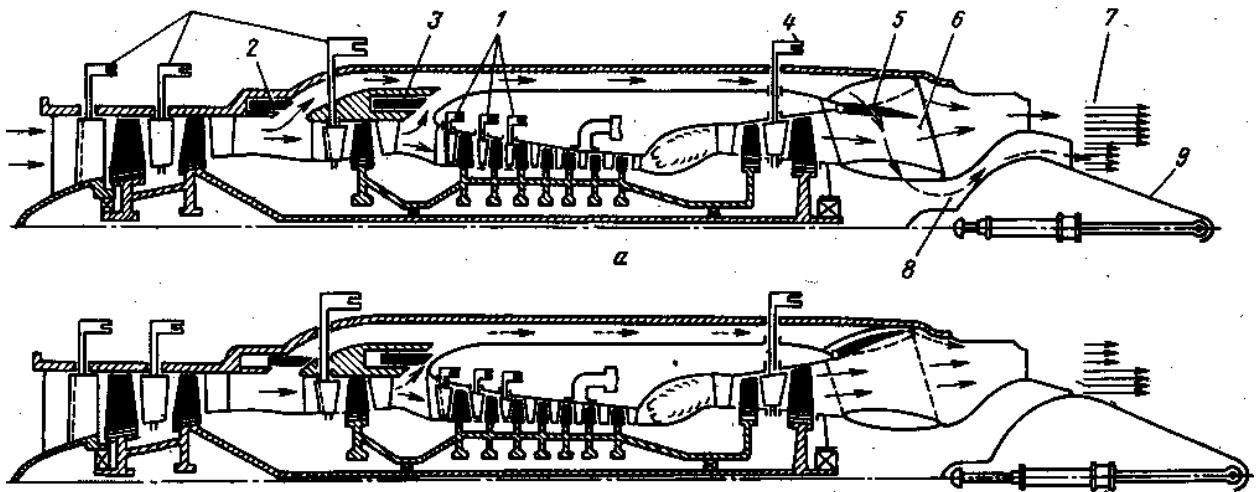
В соответствии с развитием технологий в двигателестроении выделяют **двухконтурные ДИП**. На рисунке 1.11 приведена схема двигателя с изменяемым рабочим процессом GE-23 фирмы «Дженерал Электрик» [61]. Передний каскад представляет собой двухступенчатый КНД, имеющий регулируемые входной направляющий аппарат (ВНА) и НА 2-й ступени 1. Он приводится от турбины низкого давления, регулируемой поворотом лопаток соплового аппарата турбины (СА) 4. Задний каскад вентилятора состоит из одной ступени (среднего давления), также регулируемой поворотом лопаток НА 1, которая приводится от вала газогенератора (ГГ). Между передними и задними каскадами вентилятора выполнен канал перепуска воздуха в наружный контур, который может открываться и закрываться с помощью селекторного клапана 2. За вентилятором имеется передний регулируемый эжектор перепуска (РЭП). Этот РЭП совместно с регулируемым смесителем, который назван в этой схеме задним РЭП, позволяют изменять соотношение расходов воздуха между контурами. Передний РЭП 3 - золотниковый клапан, который перемещается в продольном направлении. Задний РЭП 5 - клапан створчатой конструкции, обеспечивающий смешение или разделение потоков. Селекторный клапан 2 может устанавливаться только в два крайних положения - "Открыто" и "Закрыто". Оба регулируемых эжектора перепуска являются высокочувствительными управляемыми элементами, служащими для изменения степени двухконтурности в широких пределах и обеспечения смешения потоков, обладающих различной энергией, с малыми потерями. Эта же система эффективно предотвращает неустойчивую работу двигателя [54, 64].

Для снижения уровня шума на взлете применимо специальное кольцевое акустическое сопло. На рисунке 1.11 показано положение регулируемых элементов для двух характерных режимов: а) на взлете и при дозвуковом полете; б) при

сверхзвуковом полете. В первом случае (режим 1) открытием селекторного клапана и обоих РЭП обеспечиваются более высокие степени двухконтурности  $m$ . Более низкие значения  $\pi_k^*$  (являющиеся оптимальными при более высоких  $m$ ) создаются прикрытием НА 3-й ступени вентилятора. Для увеличения работы переднего каскада вентилятора, через который на рассматриваемых режимах увеличивается расход воздуха, и для снижения работы, требуемой для привода заднего каскада вентилятора, который почти полностью выключается из работы (величина  $\pi_c^*$  у него уменьшается с 1,7 до 1,1), прикрываются регулируемые лопатки СА турбины низкого давления. В результате этого степень понижения давлений ТВД  $\pi_{\text{твд}}^*$  уменьшается, а степень понижения давления ТНД  $\pi_{\text{тнд}}^*$  увеличивается.

Во втором случае, соответствующем сверхзвуковому крейсерскому режиму полета (режим 2), селекторный клапан 2 закрывается, а оба РЭП и регулируемые элементы каскадов устанавливаются в положение, обеспечивающее снижение степени двухконтурности (до  $m_{\text{opt}}$ ) и увеличение  $\pi_b^*$  (до  $\pi_{b \text{ opt}}^*$ ). Для этой цели передний и задний РЭП прикрываются, а лопатки ВНА заднего каскада вентилятора и СА ТНД открываются [54, 64].

На взлете для снижения уровня шума холодный воздух из наружного контура через полые стойки 6 подается во внутреннюю кольцевую полость сопла. Кольцевая щель 8 для выпуска этого воздуха открывается вследствие перемещения центрального тела 9 в крайнее переднее положение. Горячий газ, выходящий из турбины, выпускается между стойками во внешнюю кольцевую полость сопла. Эффект гашения шума обусловлен смещением части спектра шума кольцевой высокоскоростной струи, имеющей малый гидравлический диаметр, в сторону более высоких частот и более быстрой последующей диссипацией этого высокочастотного шума окружающей средой. В полете кольцевая щель 8 закрывается и при истечении газа из сопла реализуется обычный для ТРДД профиль скоростей (рисунок 1.11, б).



*Источник: составлено автором по данным [54]*

Рисунок 1.11 – Схема ДИП GE-23:

*a* — взлет, дозвуковой режим полета; *b* — крейсерский сверхзвуковой режим полета:

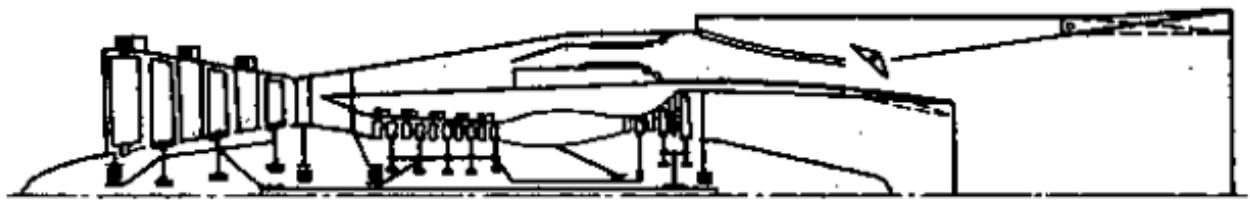
1 — регулируемые НА компрессора; 2 - селекторный клапан; 3 - передний РЭП; 4 - регулируемый СА ТНД; 5 - задний РЭП; 6 - пylon; 7 - перевернутый профиль скорости; 8 - акустическое сопло

В работах [61, 85, 96] показано, что возможность увеличения расхода воздуха при заданном значении тяги двигателя является основным достоинством данного двигателя, т.к. вследствие увеличения расхода воздуха может быть улучшено согласование совместной работы двигателя и воздухозаборника, а это обеспечит снижение внешнего сопротивления СУ и может быть получено снижение удельного расхода топлива.

На рисунке 1.12 представлена схема двигателя VSCE-502E с изменяемым рабочим процессом фирмы «Пратт-Уитни» [61]. Он получил название двигателя с независимым регулированием потоков в контурах и является конкурентом двигателя GE-23. Это двухконтурный двигатель с форсажной камерой только в наружном контуре. Он имеет полностью регулируемые КНД и КВД, что особенно важно для согласования работы входного устройства и двигателя практически при всех скоростях полета. Регулируется также сопло наружного контура и общее выходное сопло. Эта схема была выбрана специалистами фирмы после изучения и анализа 100 различных схем.

На взлете для снижения уровня шума (с целью создания эффекта взаимодействия соосных струй, имеющих «перевернутый» профиль скоростей) турбокомпрессор работает на пониженном режиме, а форсажная камера - с максимальным значением температуры форсажа. При этом скорость истечения наружной кольцевой струи на 60 ... 70 % выше, чем внутренней.

На режимах разгона самолета предусмотрено увеличение температуры газа перед турбиной  $T_g^*$  и раскрутка ротора ГГ. Это дает более интенсивное увеличение расхода воздуха через КВД, чем через КНД, что обеспечивает снижение степени двухконтурности двигателя. На дозвуковом крейсерском режиме полета форсажная камера наружного контура выключается, что дает увеличение  $m$ , и двигатель работает как ТРДД с большой степенью двухконтурности (порядка 1,5). Температура газа перед турбиной задается из условия получения наивыгоднейшей экономичности, а органы управления устанавливаются в положение, обеспечивающее наибольший расход воздуха через двигатель (для оптимального согласования совместной работы двигателя и воздухозаборника) и высокий уровень КПД элементов.



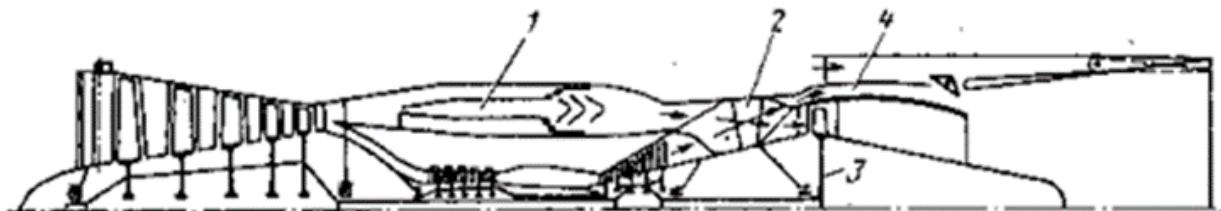
*Источник: составлено автором по данным [62, 94, 98]*

Рисунок 1.12 – Схема ДИП VSCE 502Е фирмы «Пратт-Уитни»

По данным фирмы «Пратт-Уитни» [54, 61, 82], на дозвуковых крейсерских скоростях полета удельный расход топлива получается на 20% меньшим, чем у ТРДФ «Олимп-593» сверхзвукового самолета «Конкорд». На сверхзвуковом крейсерском режиме полета двигатель имеет малую степень двухконтурности и умеренную температуру в форсажной камере сгорания (примерно 1650 K), чем обеспечивается высокая экономичность двигателя и на этом режиме полета.

На рисунке 1.13 приведена схема двигателя VCE-112B по проекту фирмы «Пратт-Уитни» с переключающим устройством - специальной системой клапанов 2, обеспечивающих либо разделение, либо смешение газовых потоков [61]. По схеме это двухконтурный двигатель с камерой сгорания 1 в наружном контуре и дополнительной турбиной 3 за перепускными клапанами 2. В конструкции переключающего устройства используется система каналов со специальными клапанами.

Воздух за КНД разделяется на два потока. На сверхзвуковых скоростях полета газовый поток внутреннего контура направляется через переключающее устройство 2 и наружный кольцевой канал 4 в обход турбины 3 во внешнюю часть реактивного сопла. В этом контуре реализуется цикл ТРД с  $\pi_{k\Sigma}^* = 25$  и  $T_g^* = 1810$  К. Камера сгорания наружного контура на этих режимах включается, и газовый поток из нее через переключающее устройство 2 направляется в дополнительную турбину 3, а затем во внутренний контур реактивного сопла. Здесь также реализуется цикл ТРД, но с более низкими параметрами  $\pi_k^*$  и  $T_g^* = 1340$  К.

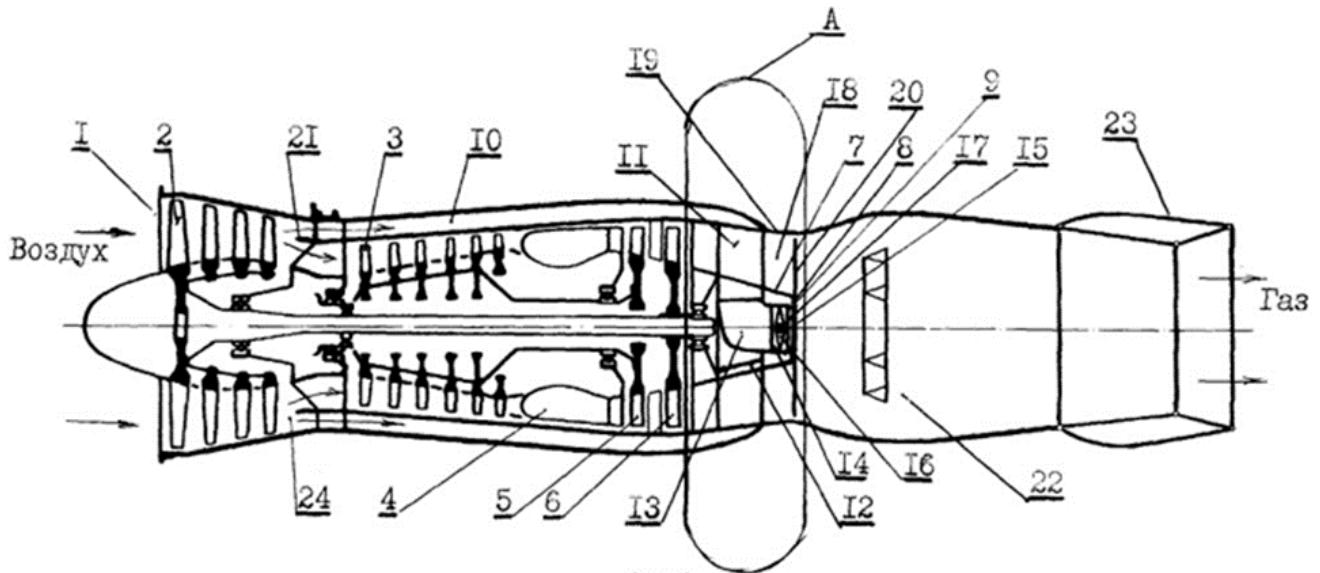


*Источник: составлено автором по данным [62, 94, 98, 99]*

Рисунок 1.13 – Принципиальная схема ДИП фирмы «Пратт-Уитни» с переключающим устройством

В дозвуковом крейсерском полете камера сгорания наружного контура выключается, створки переключающего устройства 2 устанавливаются в положение, обеспечивающее смешение обоих потоков и направление их в дополнительную турбину 3. На этих режимах двигатель работает как двухконтурный со смешением потоков со значением  $m = 2,5$ .

На рисунке 1.14 показана схема турбореактивного двигателя с управляемой степенью двухконтурности.



- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 2 - компрессор низкого давления    | 16 - клапан перепуска               |
| 3 - компрессор высокого давления   | 17 - приводной вал                  |
| 4 - камера сгорания                | 18 - затурбинный канал              |
| 5 - турбина высокого давления      | 19 - конфузор                       |
| 6 - турбина низкого давления       | 20 - минимальное поперечное сечение |
| 7 - затурбинный обтекатель         | 21 - разделитель потоков            |
| 8 - донный уступ                   | 22 - форсажная камера               |
| 9 - центральное отверстие          | 23 - реактивное сопло               |
| 10 - перепускной канал             | 24 - внутренняя полость             |
| 11 - полые радиальные ребра        |                                     |
| 12 - улиточный коллектор           |                                     |
| 13 - полый коленообразный патрубок |                                     |
| 14 - насадка                       |                                     |
| 15 - выходное сечение              |                                     |

*Источник: составлено автором по данным [62, 85, 94, 98]*

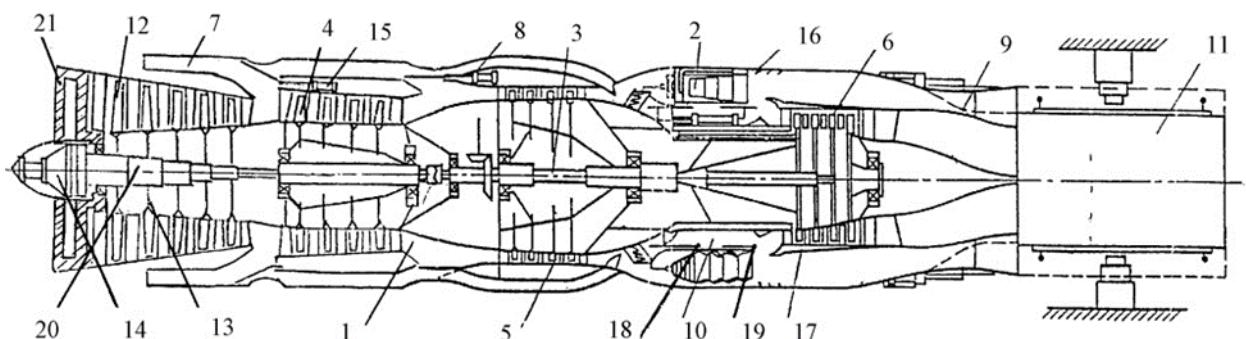
Рисунок 1.14 – ТРД с управляемой степенью двухконтурности [64].

Турбореактивный двигатель с управляемой степенью двухконтурности обеспечивает высокие тягово-экономические показатели на форсажных и максимальных режимах, сохраняя при этом хорошую топливную эффективность на дозвуковых крейсерских режимах. При этом механизм открытия и закрытия перепускного контура отличается простотой и компактностью и может быть установлен в трубе сравнительно небольшого диаметра. Конструкция такого двигателя получается достаточно сложной.

Развитие технологий в двигателестроении привело к созданию трёхконтурных ДИП. В работах [77, 78, 81, 88] показано, что наиболее перспективными является трехконтурные двигатели с адаптивным вентилятором. Двигатели таких схем в настоящее время широко прорабатывается передовыми зарубежными двигателестроительными фирмами для маневренного ЛА шестого поколения. На рисунке 1.15 представлена схема трёхконтурного ДИП, которая описана в работе [134]. Задачей, на решение которой направлено настоящее изобретение, является увеличение тяги одновального двигателя при минимальном расходе топлива с ростом высоты. Поставленная задача в части способа решается за счет того, что при способе работы трехконтурного турбореактивного двигателя летательного аппарата, включающем подачу воздуха в наружный прямоточный и внутренний контуры двигателя, сжатие воздуха в секциях основного компрессора, сжигание топлива в сжатом воздухе в камере сгорания и расширение полученных продуктов сгорания в турбине и реактивном сопле, согласно изобретению на выходе из камеры сгорания продукты сгорания разделяют на два потока, один из которых направляют в прямоточный контур, а другой смешивают с частью воздуха из охлаждающего контура и подают на вход турбины, истекающие из реактивного сопла прямоточного контура со сверхзвуковой скоростью продукты сгорания направляют в смесительную камеру, эжектируя выходящие из турбины расширяющиеся продукты сгорания, причем при работе в форсажном режиме понижают температуру в камере сгорания до температуры торможения и уменьшают подачу охлаждающего воздуха на вход турбины за счет перепуска его для смешения с продуктами сгорания, поступающими в прямоточный контур, при работе на земле и малых высотах подачу воздуха во внутренний контур двигателя осуществляют на вход основного компрессора из прямоточного контура, при увеличении высоты полета летательного аппарата выше 4000 м отключают подачу воздуха в прямоточный контур, а подачу воздуха на вход основного компрессора осуществляют через секцию дополнительного компрессора низкого давления, последовательно подключая его ступени, начиная с последней и кончая первой при достижении расчетной высоты полета, при увеличении скорости полета

летательного аппарата выше сверхзвуковой производят последовательное отключение ступеней компрессора, начиная с секции дополнительного компрессора низкого давления до последней ступени основного компрессора, и включение прямоточного контура, при этом осуществляют согласование работы секций компрессоров и турбины за счет регулирования реактивного сопла и изменения площади проходного сечения смесительной камеры [68, 83].

Поставленная задача в части способа решается также за счет того, что на больших высотах полета летательного аппарата осуществляют подачу кислорода в прямоточный контур.

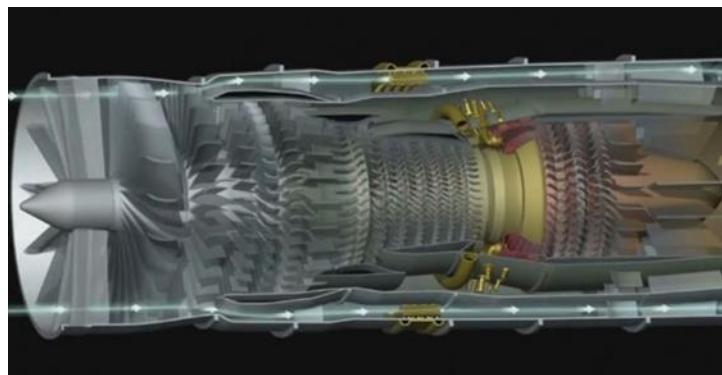


*Источник: составлено автором по данным [62, 94, 98, 134]*

Рисунок 1.15. – Схема трёхконтурного ДИП

Конструкция такого двигателя получается очень сложной, что, несомненно, повлияет на увеличение его удельной массы.

Реализация программы США по созданию перспективного авиационного ГТД приведен в работе [109]. Инженеры-конструкторы «General Electric» создали техническое решение, которое позволяет изменять количество воздуха, проходящего через второй контур. При этом часть воздуха из него может использоваться и для охлаждения (при максимальных нагрузках) (рисунок 1.16).



*Источник: составлено автором по данным [62, 94, 98, 133]*

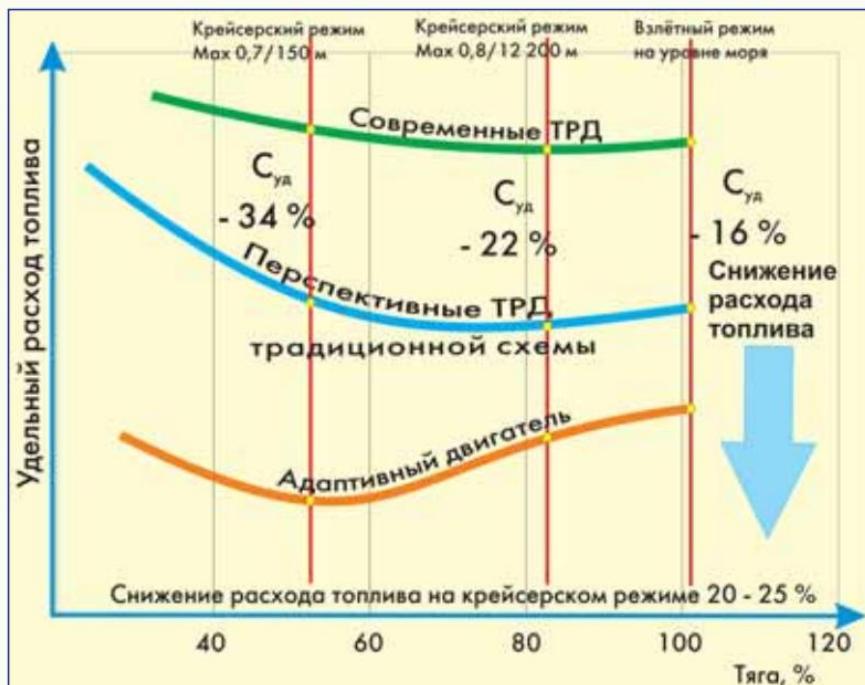
Рисунок 1.16. – Решение инженеров компании «Дженерал электрик» по изменению количества воздуха во втором контуре

В конструкции экспериментального образца ГТД применена укороченная высокотемпературная КС, подобная камерам сгорания, используемым в ракетных двигателях космической техники, которая позволяет увеличить количество сжигаемого топлива, и, соответственно, повысить тягу до уровней, которые в настоящее время требуют перехода на форсажные режимы работы силовой установки. Новая СУ должна обеспечивать устойчивое переключение степени двухконтурности на разных режимах полета. За счет возможности переключения двигателя между режимами и будет достигаться топливная эффективность. При полете на крейсерской дозвуковой скорости «третий воздушный контур» будет открыт, что позволит снизить потребление топлива.

Компании «Boeing», «General Electric», «Rolls Royce» и другие ведущие предприятия двигателестроения провели концептуальное исследование по созданию адаптивного трехконтурного двигателя, что позволит значительно улучшить топливную эффективность. Это сравнимо с переходом от ТРД к ТРДЦ.

Наличие независимого третьего контура в адаптивном авиационном двигателе обеспечивает совмещение преимуществ различных схем: низкий удельный расход топлива на дозвуковом крейсерском полёте и при барражировании, характерный для классических двухконтурных двигателей, и высокую удельную тягу в боевых режимах (короткий взлёт и посадка, сверхзвуковой режим, маневренный бой, перехват), присущую двигателям с малой степенью двухконтурности.

Достижение требуемых характеристик в широком диапазоне скоростей и высот обеспечивается за счёт увеличения давления на вентиляторе и повышения расхода воздуха через газогенератор при неизменной температуре газа перед турбиной. Такой режим позволяет снизить удельный расход топлива при дозвуковом полёте до 35% (см. рисунок 1.17).



Источник: составлено автором по данным [62, 94, 98, 132]

Рисунок 1.17 – Предварительная оценка эффективности аддативного двигателя

Наличие третьего контура обеспечивает эффективное тепловое регулирование интегрированной системы охлаждения силовой установки и самолета, способствует снижению заметности и позволяет организовать отбор воздуха для улучшения аэродинамических характеристик летательного аппарата. При рациональном управлении третьим контуром возможно поддержание постоянного расхода воздуха на входе в двигатель при его дросселировании. Это не только повышает степень двухконтурности и экономичность двигателя, но и снижает лобовое сопротивление воздухозаборника по жидкой линии.

Опытный образец аддативного двигателя должен интегрировать передовые технологии, обеспечивающие высокую эффективность и управляемость: высокотемпературные турбины с регулируемыми лопатками, вентиляторы и

компрессоры с переменной степенью давления для оптимизации расхода воздуха и газа, механизмы изменения степени двухконтурности и отбора воздуха для повышения подъемной силы, интеллектуальные автоматические системы управления, электрические приводы, эффективное распределение и использование энергии, современные системы охлаждения двигателя и летательного аппарата, детали из композитных и керамических материалов, а также усовершенствованную интеграцию воздухозаборника и реактивного сопла для снижения аэродинамических потерь и повышения тягово-экономических показателей.

Эффективность применения трёхконтурного адаптивного двигателя шестого поколения (VCE) была проанализирована в работе [67] в сравнении с турбореактивными двухконтурными двигателями (ТРДЦ) 5-го и 6-го поколений традиционных схем. Сравнение проводилось для трёх типов летательных аппаратов: высокоманёвренного тактического истребителя, дозвукового ударного самолёта большой дальности и сверхзвукового ударного самолёта. При этом для всех рассматриваемых силовых установок предусматривалось выполнение одинаковых требований по отбору воздуха — не менее 15 % от суммарного расхода через двигатель — для охлаждения хвостовой части, а также обеспечения функционирования систем самолёта и самого двигателя [54, 82, 93].

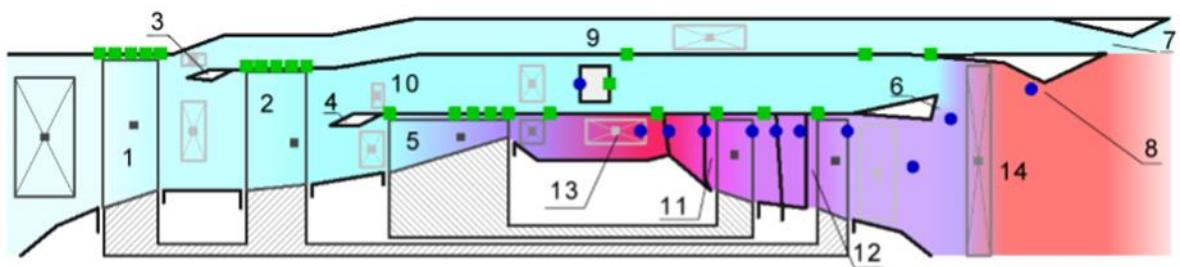
Конфигурация трёхконтурного двигателя в целом сохраняет элементы, характерные для турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой (ТРДДФ), но дополняется рядом конструктивных компонентов: отдельным каналом третьего контура, регулируемым соплом этого контура и управляемым разделителем потоков, позволяющим при необходимости перекрывать его вход. Благодаря использованию большинства базовых элементов ТРДДФ в составе ДИП (двигателя изменяемой степени трёхконтурности) затраты на разработку и внедрение подобной схемы могут быть существенно снижены.

Развитие таких типов двигателей может получить как в военной, так и в гражданской авиации (сверхзвуковые гражданские самолеты) [80, 53, 58].

В самолетах 5-го поколения и в будущем большое значение имеет незаметность самолета. Силовая установка является самой большой проблемой.

Из-за высокой температуры выходящей из сопла струи самолет заметен для ракет с самонаведением и «светиться» на радарах возможного противника. Трехконтурный двигатель должен показать лучшие результаты незаметности. Холодный поток воздуха, выходящий из сопла третьего контура, экранирует струю, выходящую из основного реактивного сопла.

Трехконтурный двигатель изменяемого процесса (ТДИП) содержит все элементы, имеющиеся у ТРДДФсм. В отличие от традиционного ТРДДФсм, ТДИП (рисунок 1.18) также содержит: канал 3-го контура (9); регулируемое сопло 3-го контура (7).



*Источник: составлено автором по данным [62, 94, 97, 98, 133]*

Рисунок 1.18 – Расчетная схема ТДИП

В работе [78] была проведена оценка преимуществ одного из вариантов трехконтурного двигателя по сравнению с двигателем традиционной схемы. Перепуск воздуха в третий контур увеличивает массовый расход на входе в двигатель и при работе в дроссельном режиме способствует снижению гидравлического сопротивления тракта, отбор воздуха на промежуточной ступени вентилятора смешает область максимального КПД в зону более низких частот вращения, что обеспечивает возможность незначительного повышения предельного значения КПД, при дроселировании двигателя увеличение расхода через третий контур приводит к росту эффективной степени двухконтурности, что положительно сказывается на топливной экономичности в дозвуковом крейсерском полёте, выброс воздуха через третий контур оказывает минимальное влияние на суммарные потери в выходном устройстве, не снижая эффективность работы соплового аппарата.

Результаты исследований, проведённых в работе [67], показали, что трёхконтурная схема позволяет заметно улучшить согласование входного устройства, двигателя и выходного устройства в составе силовой установки многоцелевого сверхзвукового ЛА. На дозвуковых крейсерских режимах полета за счет третьего контура удается добиться снижения расхода топлива на 7 – 11 %, на сверхзвуковых бесфорсажных режимах – на 3%. Основным положительным эффектом является снижение сил внешнего сопротивления, что уменьшает нагрузку на двигатель и, соответственно, расход топлива. В предложенной схеме ДИП отбор воздуха из первой ступени компрессора низкого давления может негативно сказаться на устойчивой работе КНД при закрытом третьем контуре. Однако, как показано в работах [54, 67], увеличение массы силовой установки не превышает массы топлива, сэкономленного за один типовой полёт.

В диссертации изучены особенности технологии работы авиационных двигателей, определены параметры, требующие улучшений, выделены возможные эффекты и риски разработки КС технологий в двигателестроении.

### **1.3 Подходы к анализу полезности и рисков разработки и внедрения КС технологий**

Критериями целесообразности разработки, внедрения технологий могут быть эффект, эффективность, а также формируемая ценность от использования технологии. Оценку эффекта осуществляют посредством анализа прибыли, эффективности с помощью показателей рентабельности. Однако эффект технологии может не давать эффекта в текущем периоде, он может проявляться в перспективе или быть в составе синергетического эффекта. Эффект может состоять в развитии науки (без коммерциализации в текущем периоде) или снижении технологической зависимости. Таким образом, показателей прибыли и рентабельности недостаточно для оценки эффективности КС технологий. Предлагается для оценки разработки и внедрения КС технологий использовать показатель полезности. Понятие полезности в трудах учёных относится к различным аспектам оценки ценности и эффективности товаров, услуг или технологий. Акцент делается на способности удовлетворять потребности и требования заказчиков. В экономической теории и других научных дисциплинах

полезность является определяющим фактором в анализе поведения потребителей, принятии решений и распределении ресурсов [36].

В экономической науке существует теория полезности, основанная на субъективной ценности товара или услуги для потребителя [32, 33, 38, 42]. Понятие полезности в микроэкономике определяется кривыми безразличия, полезность является мерой удовлетворения от потребления определённого набора товаров и используется для анализа выбора потребителя. В неоклассической теории под полезностью понимается количественно измеримый эффект. Определяется функция полезности, позволяющая оптимизировать решения потребителей и производителей [32, 33, 36].

В современной экономической науке, например, в поведенческой экономике или нейроэкономике, исследуются более сложные, междисциплинарные, синергетические аспекты полезности. Под полезностью технологии понимается способность приносить пользу, повышать эффективность и качество жизни людей, решать тактические и стратегические задачи. Полезность необходимо оценивать комплексным показателем, который определяет насколько технология решает конкретные проблемы, улучшает процессы или создает новые возможности для пользователей и общества в целом [39, 42, 55]. Таким образом, в трудах учёных понятие полезности служит базисом для анализа поведения экономических субъектов и оценки эффективности различных решений, продукции, технологий.

На основе изучения нормативной правовой базы проведена классификация параметров оценки критических и сквозных технологий по принципу многоуровневости: полезность КС технологии для науки и техники, полезность для характеристик ВТП, предприятий производителей на основе риск-ориентированного подхода, полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства. Под полезностью в исследовании понимается комплексный показатель изменения характеристик, оцениваемый в соответствии с разработанной шкалой.

Одной из основных проблем разработки КС технологии является недостаточно точная предсказуемость эффекта для науки и для изменения характеристик ВТП, то есть существуют риски. Кроме того, проблемой реализации КС технологии в ВТП является недостаточно точная предсказуемость коммерческого эффекта и низкая готовность производства реализовать разработку вследствие устаревания основных производственных фондов [36, 38, 39]. Важной

проблемой является сложность прогнозирования влияния технологии на развитие смежных отраслей и на повышение уровня технологической независимости государства. Таким образом, необходимо учитывать не только полезность, но и риски разработки и внедрения КСТ для ВТП, предприятий изготовителей, государства. Под полезностью разработки и реализации технологии в исследовании понимается комплексный показатель изменения характеристик продукции, использующей технологию, предприятий изготовителей, уровня технологической независимости государства, оцениваемый в соответствии с разработанной шкалой.

Под риском разработки и реализации технологии понимается показатель учитывающий неопределённые события или условия, которые могут произойти и повлечь негативные изменения характеристик продукции, использующей технологию, предприятий изготовителей, уровня технологической независимости государства, оцениваемый в соответствии с разработанной шкалой.

Результат производства ВТП критическим образом зависит от первоначальных концепций будущего образца АТ и создания технического задания, используемых технологий. По этой причине в диссертационном исследовании особое внимание уделено оценке рисков разработки и реализации технологии во избежание неэффективного и нерационального использования ресурсов, что приводит к отставанию на мировом рынке российских авиационных систем.

Проблемы качественного скачка в авиастроительной отрасли связаны с высокой зависимостью от импортного оборудования, композитных материалов и сплавов, а также с принятием неэффективных решений при реализации разработанных технологий [61]. Достоверная оценка необходимости внесения изменений в производство в результате внедрения ключевых систем (КС) технологий поможет избежать нецелевого и неэффективного расходования средств и будет способствовать качественному развитию отрасли.

Основной причиной неэффективного принятия решений в области финансирования внедрения разработанных технологий в авиапромышленности

является низкое качество цифровых аналогов и недостоверная оценка экономической эффективности реализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) [84].

В условиях неопределенности разрабатываемые инструменты и механизмы должны обеспечивать оперативное сравнение различных производственных вариантов, сокращая сроки разработки концепции и технического задания и ускоряя запуск в производство наиболее эффективного образца. Риск всегда в основе имеет факторы неопределенности. Проблема разработки и реализации критических и сквозных технологий заключается в наличии этих факторов неопределенности. Среди российских ученых, исследующих вопросы неопределенности, выделяется Р. И. Трухаев. Согласно его подходу, неопределенность при принятии решений связана с ограниченной достоверностью и объемом информации, на основе которой принимается решение. Он определяет неопределенность как основную черту недостаточной ясности процесса принятия экономических решений в конкретной проблемной ситуации [32, 39, 42, 55, 69].

Среди зарубежных исследований, посвященных проблемам неопределенности в принятии решений, выделяются работы Ф. Найта. В своей книге «Риск, неопределенность и прибыль» он проводит различие между риском и неопределенностью, определяя риск как «измеряемую неопределенность», то есть такую, где соответствующие факторы поддаются количественной оценке и частично предсказуемы. В то же время неопределенность, по его мнению, включает факторы, которые невозможно количественно измерить и, следовательно, не поддаются прогнозированию. Неопределенность присутствует на всех уровнях экономической системы в процессе планирования, принятия решений и выполнения действий, сопутствуя риску [49, 76]. С. Роббинсом и М. Коултером под стохастической неопределенностью понимается появление неопределенности происходит из-за вероятностных (стохастических) аспектов изучаемых процессов и явлений. включает точную информацию, случайные воздействия и проверку гипотез [86, 91, 99]. Техническая неопределенность заключается в том, что невозможно точно предсказать результаты принятых решений. Перспективная

неопределенность связана с неожиданными факторами, которые могут повлиять на развитие объектов или процессов и которые ещё недостаточно изучены [108].

В качестве источников неопределенности можно выделить:

- Множество внешних и внутренних факторов, а также их синергия.
- Неполноту или неточность информации.
- Низкий уровень квалификации лица, принимающего решение (ЛПР), в данной ситуации.
- Ограничения, возникающие при принятии решения в конкретных обстоятельствах [106].

Таким образом, неопределенность усложняет процесс анализа эффективности разработки и внедрения КС технологий и является основой рисков. К факторам рисков (как характеристике потерь от разработки и реализации технологии), влияющим на оценку эффективности технологий можно отнести: санкции, устаревание производственных мощностей, нехватку финансовых и иных ресурсов, стремительную смену технологий, разработку новых материалов, а также изменения в требованиях клиентов и потребностях потребителей [109].

Данное диссертационное исследование основано на гипотезе многофакторности рисков как следствия проявления факторов неопределенности. А также на связи параметров рисков разработки и реализации КС технологий на уровнях: наука, ВТП, предприятия-изготовители, технологическая независимость государства. Проведено изучение экономических методов и инструментов анализа рисков (таблица 1.6)

Таблица 1.6 – Экономические методы анализа риска разработки и реализации КС технологий

<b>Название метода</b>	<b>Сущность (этапы) метода</b>
Анализ последствий и критичности отказов FMEA и FMECA	Проводится анализ причин и последствий возможных сценариев сбоев. Дополнительно к FMEA, можно провести анализ их критичности FMECA, позволяющий определить степень критичности.
Марковский анализ	Оценивается вероятность того, что система окажется в определенном состоянии в последующий момент времени.
Сценарный анализ	Выявляются потенциальные сценарии будущего путем формулировки предположений, экстраполяции текущего положения или использования моделирования. После этого проводится оценка риска для всех сценариев.

Методы нечеткой логики	Используется для управления неопределенностью нечетких знаний, дополняя или заменяя вероятностные методы. Степень отнесенности к множеству определяется при помощи функции принадлежности $\mu(A(x))$ , значение которой находится в интервале $[0,1]$ . Данный нормированный интервал выбран для стандартизации вычислений в процессе обработки информации и принятия решений.
Анализ «Дерево ошибок» (Fault Tree Analysis, FTA)	Позволяет выявить причины возможных отказов или проблем в технологии. Строится графическая модель, показывающая цепочку событий, ведущих к нежелательному исходу.
Анализ «Событийных деревьев» (Event Tree Analysis, ETA)	Используется для оценки возможных сценариев развития событий после начального сбоя. Помогает определить вероятности различных исходов и их последствия.
Метод экспертных оценок	Вовлечение специалистов для оценки рисков на основе их опыта и знаний. Часто используется в сочетании с другими методами для получения более точных данных.
Метод сценарного анализа	Разработка различных сценариев внедрения технологии с учетом возможных рисков. Позволяет подготовиться к различным ситуациям и выбрать оптимальный путь реализации
Анализ чувствительности	Определение ключевых факторов, влияющих на успех проекта. Помогает понять, какие параметры требуют особого контроля.
Метод Монте-Карло	Моделирование множества сценариев с использованием случайных значений параметров. Позволяет получить распределение вероятностей возможных рисков и их влияния.
SWOT-анализ, методы оценки стоимости и окупаемости	Оценка сильных и слабых сторон проекта, а также возможностей и угроз. Помогает выявить внутренние и внешние риски. Анализ финансовых рисков, связанных с затратами и доходами от внедрения технологии.
Методика оценки технологической зрелости (Technology Readiness Level — TRL)	Оценка стадии развития технологии для определения рисков, связанных с её внедрением

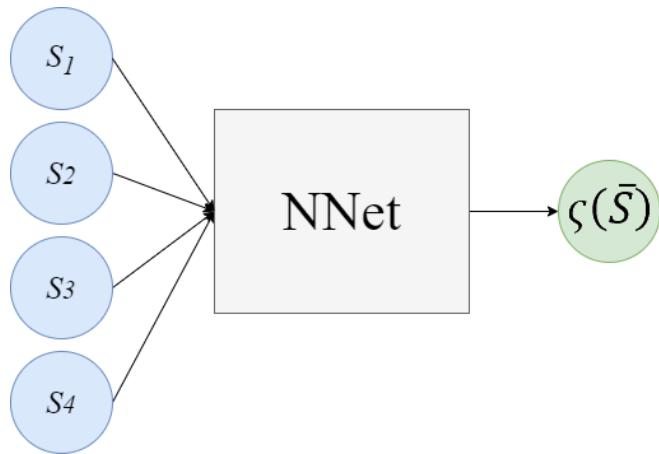
Источник: составлено автором по данным [36, 73, 74]

Теория игр используется для моделирования процесса принятия решений в условиях неопределенности, следовательно, положения данной теории возможно применять для анализа риска разработки и реализации КС технологий.

Классическая модель рассматривает антагонистическую игру между двумя игроками, где выигрыш одного игрока равен потере другого. Модель состоит из элементов  $\{P, Q, A\}$ , где  $P \in R^n$  представляет вектор вероятностей стратегий первого игрока,  $Q \in R^m$  — вектор вероятностей стратегий второго игрока, а  $A \in R^{(m \times n)}$  — матрица выигрышей и проигрышей, где элементы обозначают размеры выигрышей первого игрока и проигрышей второго. Принятие решений в условиях неопределенности подразумевает выбор оптимальной стратегии поведения для этих целей возможно применить имитационное моделирование [39, 42, 43, 50, 55].

Среди методов искусственного интеллекта выделяются нейронные сети, показывающие эффективность в решении задач классификации и регрессии. Оценка рисков разработки и реализации критических и сквозных технологий является такой задачей, поскольку создание и модификация продукции в авиастроении и двигателестроении осуществляется через разработку множества цифровых двойников, улучшающих летные характеристики летательных аппаратов. Преимуществом нейросетевых моделей в этой сфере является их способность учитывать скрытые связи между данными, которые не могут быть зафиксированы традиционными статистическими методами. Серьезным недостатком является сильное влияние на модель обучающей выборки. Для решения вопроса оценки факторов риска при разработке технической продукции показана возможность применения нейросетевого моделирования [121, 123, 124]. Основа метода в построении функции неопределенности  $\zeta(\bar{S}): R^n \rightarrow [0; 1]$ , зависящего от факторов  $S_i \in \bar{S}, i = 1..n$ , поддающихся количественному описанию.

Обучающая выборка формируется из данных, полученных при использовании детерминированных методов теории игр, имитационного моделирования или энтропии Шеннона. Входными данными служат статистические значения факторов неопределенности, а выходными — соответствующие детерминированные оценки уровня неопределенности. В общем виде схема НС для моделирования неопределенности представлена на рисунке 1.19.



*Источник: составлено автором по данным [37, 73, 106,]*

Рисунок 1.19 – Схема НС для учёта факторов риска

Проведённое исследование показывает, что важнейшим компонентом разработки и реализации в ВТП критических и сквозных технологий является проведение большого количества испытаний. Более надежно и экономически целесообразно проводить такие испытания в виртуальном пространстве, то есть с применением цифровых двойников. ЦД предлагается рассматривать как модель определения полезности и рисков разработки и реализации в ВТП критических и сквозных технологий. Цифровой двойник, как виртуальная модель физического объекта или системы, позволяет отслеживать, анализировать и оптимизировать его работу в реальном времени. Использование технологии ЦД в процессе разработки и реализации КС технологий в двигателестроении и авиастроении позволит повысить эффективность разработки, снизить затраты и ускорить процесс внедрения КС технологий [42, 55].

Цифровой двойник в двигателестроении и авиастроении включает:

1. Виртуальную модель двигателя или авиасистемы, включающая технические параметры, материалы, конструктивные особенности.
2. Данные, поступающие с датчиков на прототипах или серийных образцах, а также исторические данные об эксплуатации.
3. Аналитический блок, включающий обучение, моделирование и симуляции для оценки характеристик, выявления потенциальных проблем и оптимизации конструкции.

4. Интеграционный процесс, определяющий связь между виртуальной моделью и реальными объектами для постоянного обновления данных и обратной связи.

В двигателестроении Цифровые двойники целесообразно использовать для: моделирования аэродинамических характеристик, тепловых режимов и механической прочности для оценки эффективности новых конструкций без необходимости создания физических прототипов в процессе разработки новых двигателей. Кроме того, для симуляции работы двигателя в различных условиях, в целях выявления оптимальных параметров работы при тестировании и оптимизации. ЦД используются для мониторинга состояния двигателей в эксплуатации с помощью датчиков, прогнозирования отказов и планирования технического обслуживания в процессе обслуживания и предиктивной аналитики, а также для обучения инженеров и техников. Преимуществами использования цифрового двойника при анализе разработки и реализации КС технологий является сокращение времени разработки новых технологий; уменьшение затрат на создание прототипов; повышение надежности и безопасности систем; быстрая адаптация к новым требованиям рынка, снижение рисков.

## **Выводы по 1 главе**

Проведён анализ теоретических и методологических подходов, представленных в фундаментальных работах отечественных и зарубежных исследователей, посвящённых проблемам оценки процессов разработки и внедрения критических и сквозных технологий, а также эффективности проведения НИР и ОКР. В нормативных правовых документах определены задачи повышения экономической безопасности РФ к которым можно отнести обеспечение перестройки экономики на технологической основе, создание высокотехнологичных производств, новых отраслей экономики, преодоление критической зависимости российской экономики от импорта технологий и др. Основными направлениями КС технологий являются: технологии в

двигателестроении, обработки и передачи данных, квантовые вычислительные системы и квантовое моделирование.

Наблюдается положительный тренд развития двигателестроения, планируется внедрение двигателей ПД-8, ПД-14, ВК-1600В. Изучены особенности современных технологий в двигателестроении. Принципиальная сложность разработки многорежимных двигателей для сверхзвуковых самолетов обусловлена принципиальной противоположностью требований к их работе на различных режимах. В исследовании обоснована классификация параметров оценки критических и сквозных технологий по принципу многоуровневости: полезность КС технологии для науки и техники, полезность для характеристик ВТП, предприятий производителей, полезность для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков. Под полезностью разработки и реализации технологии в исследовании понимается комплексный показатель изменения характеристик продукции, использующей технологию, предприятий изготовителей, уровня технологической независимости государства, оцениваемый в соответствии с разработанной шкалой. Выдвигается гипотеза многофакторности рисков как следствия проявления факторов неопределённости. С целью минимизации неопределённости разработки и реализации КС технологий рекомендуется использовать цифровой аналог. Преимущества использования цифрового двойника состоят в сокращении времени разработки новых технологий, уменьшении затрат на создание прототипов, повышении надежности и безопасности систем, быстрая адаптация к новым требованиям рынка. Перечисленные обстоятельства обосновывают необходимость формирования экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении.

## ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

### **2.1. Методический подход к оценке полезности разработки КС технологий в двигателестроении**

Разработка технологических решений, проектирование и доводка узлов современных вертолётных двигателей является сложной и комплексной научно-технической задачей. Оценка полезности разработки для науки и ВТП авиастроения, где технология применяется также является актуальной задачей. В процессе решения этих задач необходимо удовлетворить требования газодинамической эффективности, прочности, массы, ресурса, как правило, на различных режимах работы [114, 115]. При этом необходимо учитывать, что характеристики узлов двигателя зависят от большого количества параметров как геометрических, так и режимных. Одним из подходов, позволяющих решить данную научно – техническую задачу является концепция «Виртуального стенда». Данная концепция позволяет выполнять проектирование и доводку узлов авиационного двигателя с использованием многодисциплинарных моделей различного уровня, созданных с помощью программных комплексов NumecaFineTurbo, Concept NREC и ANSYSMechanical, а также технологии многокритериальной оптимизации IOSO. Одной из методологий концепции «Виртуального стенда» является методология многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации узлов авиационного двигателя. В рамках работы была изучена разработка элементов технологии для каждого из узлов авиационного двигателя: компрессора, турбины газогенератора, свободной турбины. Разработанная технология многодисциплинарной многокритериальной оптимизации каждого из узла двигателя включают в себя следующие компоненты:

1. Программный комплекс многокритериальной оптимизации IOSOPM;

2. Программные комплексы параметрического перепрофилирования лопаток узлов авиационного двигателя и параметрические модели к ним;
3. Программный комплекс вычислительной газовой динамики NumecaFineTurbo и специализированные макросы к нему;
4. Программный комплекс ANSYSMechanical и специализированные макросы к нему.

Элементом технологии «Виртуального стенда» является векторная идентификация 2D моделей узлов вертолётных двигателей по результатам расчёта при 3D моделировании. 2D модели позволяют существенно увеличить скорость проектирования и доводки узлов авиационного двигателя, а повышение точности 2D моделей можно добиться за счёт их векторной идентификации. Ключевым компонентом технологии векторной идентификации является программный комплекс *IOSO*, а 2D модели узлов авиационного двигателя создаются в программном комплексе *ConceptNREC*.

В диссертации изучен подход и определены основные особенности многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации узлов авиационного двигателя. Определены основные особенности узлов авиационного двигателя, как объектов оптимизации. Узлы авиационного двигателя являются основными элементами технической системы более высокого уровня, а именно – газотурбинного двигателя (ГТД), и, следовательно, степень "оптимальности" того или иного узла необходимо оценивать с точки зрения эффективности его использования для выполнения конкретных задач, решаемых ГТД. В настоящее время существует огромное количество ГТД, различающихся по типу, по целям функционирования, по обеспечивающим показателям и т.д., и для каждого из таких ГТД может быть разработан свой «оптимальный» вариант узлов.

Несмотря на общность решения задач нелинейного программирования, оптимизация узлов авиационного двигателя имеет ряд особенностей. Прежде всего, в связи с противоречивостью требований, предъявляемых к узлам, практический интерес представляет поиск экстремальных и компромиссных значений целого множества показателей эффективности, таких как КПД, масса,

мощность, ресурс, ряд прочностных показателей и др [92, 101]. С этой точки зрения задача оптимизации является многокритериальной. При решении практических проблем из всей совокупности показателей эффективности, как правило, выбираются один или несколько наиболее важных, и решения ищутся в некоторой ограниченной области, задаваемой исходя из газодинамических, кинематических, конструктивных, технологических и других соображений. В целом, это приводит к задаче однокритериальной или многокритериальной условной оптимизации. Результатом оптимального проектирования является определение оптимальных значений таких проектных параметров, которые не могут быть изменены в процессе эксплуатации. В качестве таких параметров, как правило, рассматриваются все геометрические параметры узлов авиационного двигателя.

### **Структура и составные части технологии многоцелевой оптимизации сложных технических систем.**

Несмотря на общность решения сложных прикладных задач нелинейного программирования применительно к узлам авиационного двигателя имеется ряд специфических особенностей. Оптимизация таких сложных объектов, как компрессор, турбина газогенератора, свободная турбина, невозможна путем механического соединения математической модели и метода нелинейного программирования. По сути, это целый процесс оптимизационных исследований (ОИ), для реализации которого разрабатывается стратегия поиска наиболее эффективных технических решений, базирующаяся на соответствующих методологических, алгоритмических, программных и других средствах.

На рисунке 2.1. в укрупненном виде представлена блок-схема технологии оптимизации. Начальный этап представляет собой формирование задания на оптимизацию, которое включает определение *цели и способов* ее достижения. Применительно к узлам авиационного двигателя в качестве *целей* могут рассматриваться показатели, характеризующие их эффективность, например, КПД, мощность, расход рабочего тела на различных режимах работы, ряд прочностных показателей и др.



*Источник: составлено автором по данным [98]*

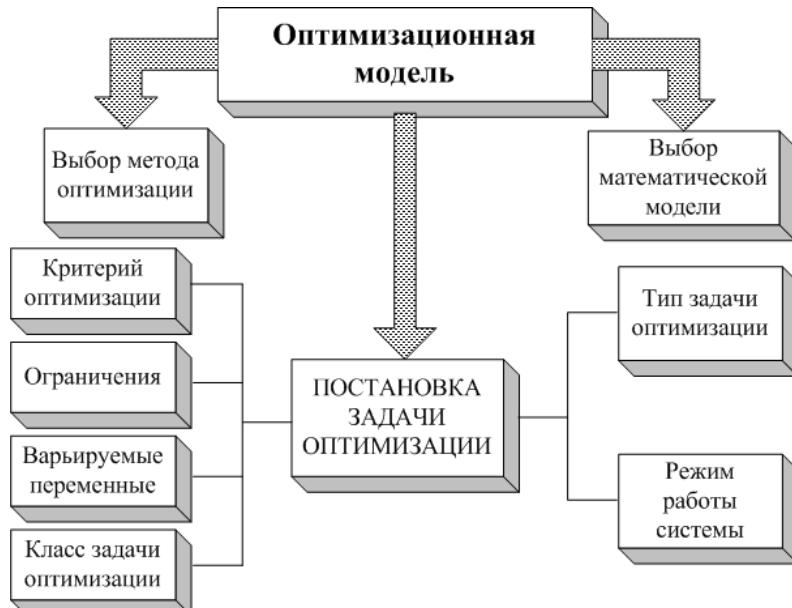
Рисунок 2.1 – Блок – схема технологии оптимизации сложных технических систем

В качестве *способов* достижения поставленной цели может рассматриваться процесс проектирования (разработка нового, либо модификация имеющегося проекта узла авиационного двигателя). После выбора способа конкретизируется постановка задачи частного оптимизационного исследования. В целом, оптимизационные исследования включают 3 основных этапа. Во-первых, это разработка *оптимизационной модели*, во-вторых, *процесс решения задач оптимизации* и, в-третьих, *анализ полученных результатов*.

Этап постановки задачи оптимизации осуществляется совместно с техническими экспертами, обладающими высоким уровнем профессиональных знаний в исследуемой области. Примером частной задачи оптимизации может быть модификация компрессора, турбины газогенератора, свободной турбины авиационного двигателя с целью улучшения их эффективности. При этом степень модификации базовых узлов может быть различной. Как правило, на начальном

этапе представляется актуальным просмотр нескольких вариантов, не требующих значительных затрат при реализации, например, это может быть изменение углов установки лопаточных венцов. На последующих этапах может возникнуть необходимость более глубокой модификации, вплоть до полного перепроектирования узла [70, 123]. Конкретизация постановки задачи на этом этапе позволяет выполнить разработку *оптимизационной модели* исследуемого объекта (рисунок 2.2), которая представляет собой совокупность его математической модели, критерия (критериев) оптимизации, позволяющих оценить качество того или иного решения; варьируемых переменных, определяющих, за счет чего осуществляется попытка улучшить эффективность технического решения; ограничений, определяющих область, где допускается поиск экстремума.

Выбор критериев оптимизации, варьируемых (оптимизируемых) переменных и ограничений определяет выбор уровня моделирования объекта.



*Источник: составлено автором по данным [99]*

Рисунок 2.2 – Формирование оптимизационной модели

Количество критериев, ограничений, варьируемых переменных и уровень моделирования объекта, соответствующий поставленной задаче, определяет выбор метода оптимизации. К примеру, если задача оптимизации имеет примерно 10...20 переменных, то может с успехом использоваться, скажем, метод Пауэлла. Если

переменных порядка 100, то есть все основания полагать, что успешное решение этой задачи с использованием этого метода маловероятно. Разработанная оптимизационная модель и является тем инструментом, который позволяет выполнять оптимизационные исследования в рамках рассматриваемой частной задачи оптимизации.

Следующий этап - процесс решения задачи оптимизации, который состоит из 2-х основных процедур (рисунок 2.3).

На *предварительном этапе* выполняются все необходимые операции, после осуществления которых появляется возможность непосредственно приступить к поиску экстремума при помощи ЭВМ. При решении серьезных практических проблем требуются существенные временные затраты для поиска решения. Поэтому использовать недостаточно проверенную оптимизационную модель для нахождения экстремума нерационально. Исходя из этого, предварительный этап чрезвычайно важен. Здесь проверяется чувствительность оптимизационной модели, ее корректность, устойчивость и т.п. Кроме того, выполняется важный этап выбора способа определения ограничений критерия оптимизации, а также оцениваются временные затраты на ЭВМ, потребные для решения задачи. Последнее во многом определяет тип ЭВМ, необходимый для решения задачи оптимизации.



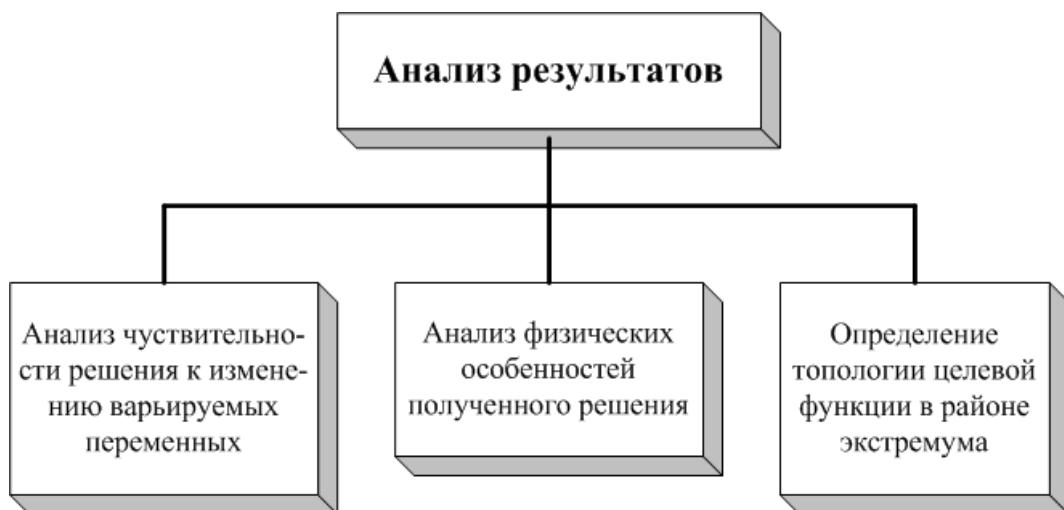
*Источник: составлено автором по данным [100]*

Рисунок 2.3 – Процесс решения задачи оптимизации

После предварительного этапа наступает этап *численного поиска* решения. Итогом этого этапа является экстремальное значение критерия, а также оптимальные значения оптимизируемых (например, проектных) параметров. Важно подчеркнуть, что при проведении оптимизации по многим критериям в итоге этого этапа получается целое множество Парето-оптимальных решений задачи.

Для технических экспертов полученные точки представляет собой не более чем дополнительную информацию об узле авиационного двигателя, а именно, выделяется та область параметров, которая считается перспективной с точки зрения повышения эффективности. Именно в этой области целесообразно проводить углубленный анализ физических процессов, протекающих в узле авиационного двигателя, с целью понимания особенностей возникающих явлений и формирование на физическом уровне четкого и ясного понимания причин повышения эффективности узла авиационного двигателя именно в этой области.

На рисунке 2.4 представлены основные этапы анализа полученных результатов. На этой стадии фактически осуществляется взаимный целенаправленный обмен информацией между экспертом и исследуемым объектом, причем в области наилучших технических решений. Особенность данного исследования заключается в том, что для технического анализа из бесконечного множества альтернативных вариантов выбираются лишь те, которые являются наилучшими с точки зрения постановки задачи на оптимизационное исследование.



*Источник: составлено автором по данным [93]*

Рисунок 2.4 – Основные этапы анализа результата оптимизации

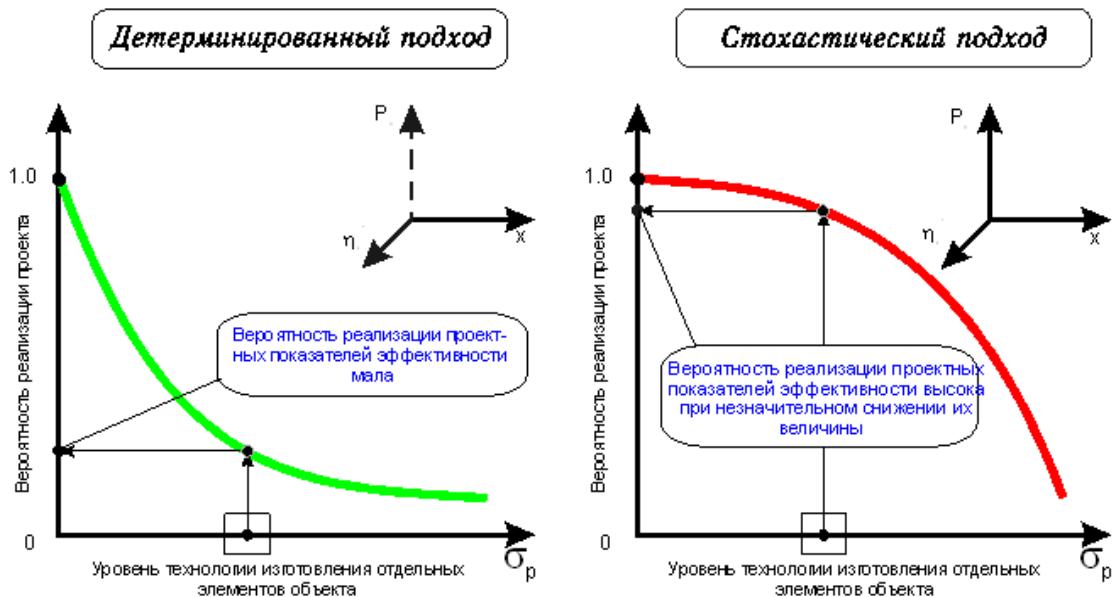
Как правило, *анализ полученного оптимального решения* позволяет эксперту получить дополнительную информацию и расширить область своих знаний и представлений о конкретном узле авиационного двигателя или его элементе. Эта дополнительная новая информация достаточно часто приводит к желанию исследователя несколько модифицировать постановку задачи, что неизбежно приводит к модификации оптимизационной модели, которая используется для решения, возможно, даже серии задач оптимизации [41]. На этом этапе в рамках выбранного способа решается серия частных оптимизационных проблем, которые отличаются по глубине модификации объекта – от незначительных изменений до полного изменения. Целесообразность таких исследований заключается в том, что, имея эту информацию (лучшие варианты при той или иной частной задаче

оптимизации), эксперт имеет четкое и ясное понимание возможностей улучшения объекта, а также потери относительно максимально возможного эффекта при уменьшении изменений в базовом объекте.

Полученные решения размещаются в банке альтернативных оптимальных технических решений, который используется для принятия окончательного выбора варианта модификации объекта. Исчерпав все возможные варианты улучшения объекта в рамках одного способа, имеется возможность получения и анализа наилучших технических решений применительно к другому способу. Итогом этой процедуры является совокупность наилучших технических решений в рамках использования различных способов достижения целей, которая позволяет принять обоснованное техническое решение. На практике иногда отсутствует необходимость получения и просмотра всего множества альтернативных оптимальных технических решений [112].

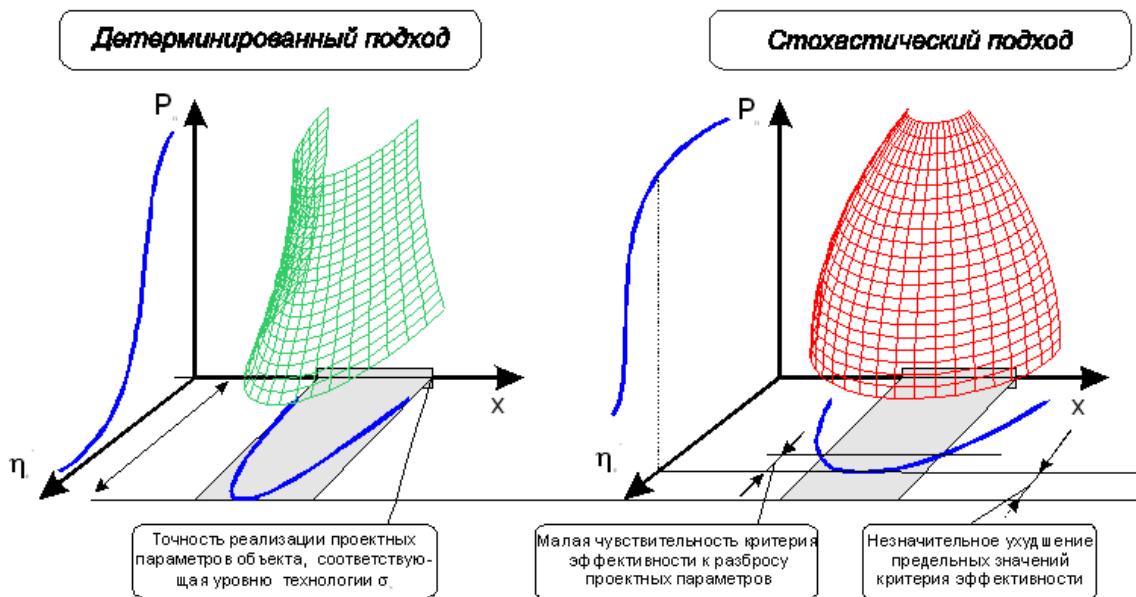
Практическая ценность результатов оптимизационных исследований во многом определяется качеством математической модели узла авиационного двигателя. Идеальная ММ должна позволять количественно оценивать узел авиационного двигателя с различных позиций (газодинамических, технологических, конструктивных, прочностных, стоимостных и др.). Данное требование находится в полном соответствии с имеющейся тенденцией **многодисциплинарного** подхода к исследованиям авиационных ГТД и их элементов [62]. Отсутствие таких “идеальных” моделей приводит к необходимости использования того комплекса математических моделей, который в настоящее время имеется в наличии у фирмы, проводящей исследования. Таким образом, отсутствие учета уровня технологии производства изделия в процессе поиска наиболее эффективных технических решений, может привести к неоправданному риску при обеспечении показателей, закладываемых на стадии разработки. Такое проектное решение в полной мере не соответствует понятию оптимального, поскольку не учитывает вероятность реализации проекта. Представляется, что данная проблема может быть успешно решена путем оптимизации в стохастической постановке (робастное проектирование), когда при

незначительном ухудшении эффективности по сравнению с детерминированным решением удается обеспечить вероятность реализации проекта близкую к 1.0. На рисунках 2.5 и 2.6 представлены качественные зависимости, поясняющие необходимость стохастической постановки задач оптимизации. Основная идея стохастического подхода заключается в использовании дополнительных вероятностных критериев оптимизации, позволяющих находить такие проектные решения, которые обладают незначительной чувствительностью к случайным отклонениям проектных параметров.



Источник: составлено автором по данным [94]

Рисунок 2.5 – Цель робастной оптимизации



Источник: составлено автором по данным [95]

Рисунок 2.6 – Эффективность робастной оптимизации

Рассматривая процесс разработки узлов авиационного двигателя в этой плоскости, можно увидеть возможность решения широкого класса проблем, весьма важных для практики. Данный подход позволяет: осуществлять разработку под конкретный уровень технологии производства; определять вероятность достижения проектных показателей при ухудшении уровня технологии на отдельных участках производства, оценивая при этом экономический эффект; обосновать требуемый уровень технологии производства изделия и спрогнозировать его потребности при разработке нового образца; осуществлять поиск наиболее "узких" мест как в самом проекте, так и в производственном цикле; на этапе разработки изделия закладывать в проект объекта определенные свойства (к примеру, малое изменение характеристик лопаточной машины в процессе выработки ресурса в запыленной местности при соответствующем изменении геометрических параметров венцов). Данный список вопросов можно продолжить. Отметим, что детерминированная постановка задачи оптимизации, традиционно используемая при разработке проекта, является лишь частным случаем стохастической оптимизации объекта.

Требование углубленных и детальных исследований ГТД с целью изучения новых явлений и процессов, которые могут позволить определить новые

технические решения, неизбежно приводит к необходимости разработки сложных и громоздких алгоритмов расчета. При моделировании на ЭВМ таких сложных объектов, как компрессор, турбина газогенератора, свободная турбина, время, потребное для исследований на мощных ЭВМ, может исчисляться часами [126]. С другой стороны, более детальное исследование объекта, как правило, приводит к увеличению возможного числа варьируемых параметров, оптимальное согласование которых следует обеспечить. В этих условиях, для успешного решения данного класса задач наличие супер-ЭВМ с большим быстродействием является необходимым, но недостаточным условием. Для этих целей требуется использование новых высокоэффективных структурно-параметрических методов оптимизации, которые практически инвариантны к топологии оптимизируемой функции и позволяют распознавать ситуацию в процессе поиска экстремума, адаптивно изменять параметры алгоритма и стратегию поиска. Данные методы позволяют осуществлять адаптивную настройку алгоритма на конкретную практическую задачу оптимизации непосредственно в процессе поиска экстремума.

В рамках данной технологии используются метод непрямой оптимизации на основе самоорганизации (*IOSO – Indirect Optimization on the basis of Self-Organization*) [62], который предназначен для решения многомерных (десятки и сотни переменных) однокритериальных и многокритериальных задач. Данный метод позволяет решать задачи оптимизации всех типов (дифференцируемая и недифференцируемая оптимизация, одноэкстремальная и многоэкстремальная, однокритериальная и многокритериальная, в детерминированной и стохастической постановках и т.п.).

Высокая инвариантность метода по отношению к типу и размерности задачи оптимизации придает технологии универсальный характер, позволяющий исследователю не задумываться о конкретных особенностях топологии целевых функций и ограничений, что повышает оперативность проведения оптимационных исследований применительно к различным техническим системам. Однако, при рассмотрении каждой конкретной проблемы (особенно в

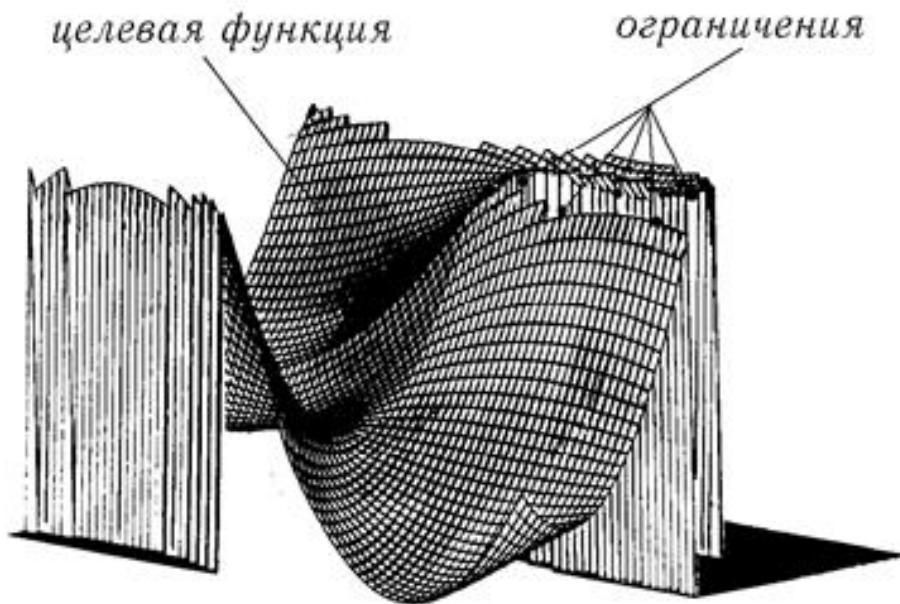
случае необходимости многократного решения однотипных задач оптимизации) может оказаться более эффективным использование и других методов оптимизации. Например, если в распоряжении исследователя имеется математическая модель, позволяющая определять не только значения целевых функций и ограничаемых параметров, но и их частные производные по варьируемым переменным, то вероятно более целесообразным будет использование градиентных методов оптимизации первого или второго порядка в сочетании с методом множителей Лагранжа [67]. В технологии нет никаких ограничений на использование других методов оптимизации, более того, существуют широкие возможности по комбинированию различных методов с *IOSO*.

#### *Основные особенности разработки технологии.*

Первая особенность заключается в возможности решения задач большой размерности (десятки и сотни переменных). Проведён анализ качественной зависимости достигаемого эффекта по увеличению КПД от размерности задачи оптимизации, полученной в результате обобщения практического опыта решения более 100 задач оптимизации многоступенчатых осевых компрессоров. Наибольшие приросты эффективности компрессора достигаются при большой размерности задачи оптимизации, т.е. в той области, где интуиция и опыт разработчиков практически бессильны [135,138]. Это связано с тем, что профессиональный уровень создателей авиационных ГТД и их элементов весьма высок. Однако, ни один эксперт физиологически не в состоянии понять взаимосвязь между 100 переменными, уже не говоря об обеспечении их оптимального согласования. По-видимому, именно в этой области находятся новые технические решения, которые на современном уровне еще не известны. Конечно, повышать эффективность можно не беспредельно, и при достижении определенного числа переменных наступает насыщение, темпы роста эффективности снижаются.

Известен факт, что с ростом размерности затраты на решение задачи оптимизации увеличиваются экспоненциально [25]. Используемые в технологии методы имеют практически линейную зависимость затрат от размерности задачи.

Другая особенность технологии заключается в возможности решения задач оптимизации для целевой функции, имеющей очень сложную топологию. Это демонстрирует рисунок 2.8, где показано изменение эффективности (КПД) одного из компрессоров в зависимости от изменения углов установки двух венцов.



*Источник: составлено автором по данным [97]*

Рисунок 2.8 – Пример топологии целевой функции

При анализе реальных объектов топология оптимизируемой функции, как правило, заранее неизвестна. Между тем, именно характер этой топологии — овражная, многоэкстремальная, гладкая и др. — во многом определяет выбор оптимизационного метода. В связи с этим для практического применения особое значение приобретает универсальность метода, то есть его способность эффективно работать независимо от конкретной формы функции [41, 79]. При этом стоит учитывать, что затраты ресурсов на изучение свойств функции могут быть сопоставимы с усилиями, необходимыми для нахождения её экстремума.

Разработанная технология использовалась для решения более 500 практических задач оптимизации авиационных ГТД и их элементов, из которых более 200 задач были направлены на доводку или модернизацию существующих

образцов (задачи улучшения прототипа). Основной целью исследований в этом случае являлось увеличение КПД отдельных элементов или снижение удельного расхода топлива двигателя. Во всех решенных задачах удалось обеспечить улучшение рассматриваемого показателя эффективности по сравнению с прототипом.

Гипотезой исследования в области разработки технологии нового двигателя с улучшенными характеристиками является многодисциплинарная оптимизация узлов авиационного двигателя.

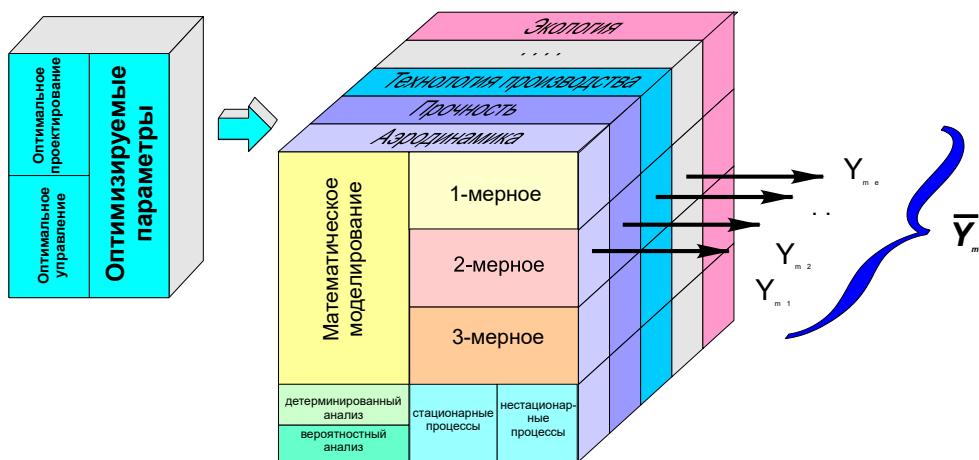
В настоящее время во многих странах, занимающих ведущие позиции в области создания перспективных авиационных и аэрокосмических систем, разворачиваются широкомасштабные исследования по разработке и внедрению в процессы проектирования средств и методов многодисциплинарной оптимизации (МДО или *MDO*) [105, 116, 131]. Основной целью этих исследований является создание таких инструментов, при помощи которых конструкторы смогут осуществлять поиск наилучших технических решений с детальным учетом особенностей проектируемых систем, оцениваемых с позиций различных научных дисциплин: газовой динамики, теплообмена, прочности, конструктивной технологичности и т.д. Разработка технологии МДО и создание высокоэффективных инструментов решения прикладных многодисциплинарных задач применительно к узлам авиационного двигателя потребовала проведения исследований в следующих направлениях:

1. Разработка инструментов численного анализа (математических моделей) узлов авиационного двигателя, пригодных для проведения многодисциплинарной оптимизации;
2. Разработка новых алгоритмов, методов и стратегии многодисциплинарной оптимизации, предназначенных для решения задач большой размерности (сотни и тысячи независимых переменных) в многокритериальной постановке;

3. Решение организационных вопросов взаимодействия коллективов, работающих в рамках различных научных дисциплин, для решения задач многодисциплинарной оптимизации.

В настоящее время создание конкурентоспособных образцов авиационных ГТД (в том числе вертолётных двигателей) и наземных ГТУ требует комплексного решения задач в области различных научных дисциплин: газовой динамики, теплопередачи, прочности, материаловедения, управления и т.д. При этом сложность решения задач многодисциплинарной оптимизации многократно возрастает даже по сравнению с весьма непростыми однодисциплинарными задачами.

На рисунке 2.9 приведена модель многодисциплинарной оптимизации узлов авиационного двигателя. Представлено, что, например, аэродинамическое совершенствование узлов авиационного двигателя, которое само по себе является самой сложной научной задачей с огромным количеством внутренних факторов, представляет собой лишь некоторую «подзадачу», входящую в задачу более высокого уровня. С этой точки зрения судить о том, насколько оптимальны те или иные геометрические параметры узлов авиационного двигателя, можно только на основании комплексного анализа эффективности узлов и даже газотурбинного двигателя в целом с учетом взаимодействия остальных подсистем.



*Источник: составлено автором по данным [98]*

Рисунок 2.9 – Проблема многодисциплинарной оптимизации узлов авиационного двигателя

Однако узлы авиационного двигателя, сам двигатель, летательный аппарат, в свою очередь, также являются лишь подсистемой систем более высокого уровня, например, транспортной системы страны. В сущности, любая техническая система может рассматриваться в качестве одного из элементов другой, более сложной системы (технической, экономической, социальной и др.) [24]. Исходя из этого, эффективность того или иного технического решения должна оцениваться по критериям системы более высокого уровня, однако, возникающие при этом методологические, алгоритмические и вычислительные проблемы могут привести к тому, что поставленная задача станет просто неразрешимой. Например, если задача оценки влияния основных параметров узлов авиационного двигателя на стоимость перевозки единицы полезного груза еще может быть решена в рамках определенных допущений, то решение задачи определения влияния, например, КПД узлов авиационного двигателя на величину, скажем, национального дохода, едва ли осуществимо в настоящее время. Основным способом решения задач повышения эффективности сложных систем является их декомпозиция, позволяющая свести исходную задачу к набору более простых (а, главное, разрешимых) задач [76].

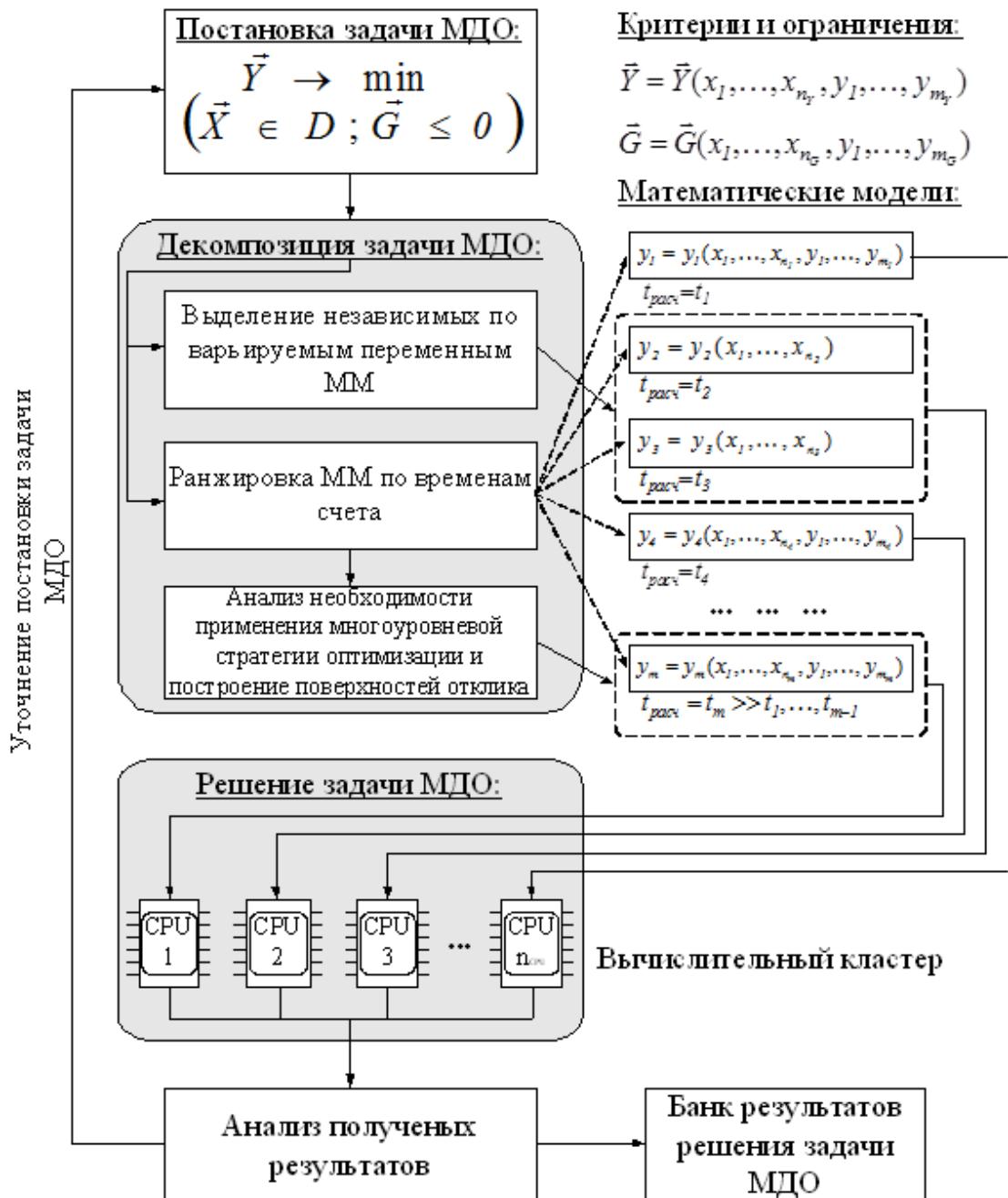
Общая методология МДО сложных технических систем в настоящее время находится еще в стадии разработки.

### ***Методика многодисциплинарной оптимизации проектных параметров узлов авиационного двигателя***

В рамках настоящих исследований была изучена разработанная технология многодисциплинарной оптимизации проектных параметров узлов авиационного двигателя, упрощённая блок-схема которой представлена на рисунке 2.10. Основной целью данной технологии является сокращение временных затрат при решении задач оптимизации за счёт выполнения специального комплекса мероприятий. Он включает в себя соответствующую подготовку используемых ММ по различным дисциплинам к проведению расчетов на ЭВМ и применение специализированных алгоритмов расчета.

Процесс решения задачи многодисциплинарной оптимизации с использованием данной технологии предполагает наличие следующих этапов:

- постановка задачи многодисциплинарной оптимизации (задачи нелинейного программирования);
- декомпозиция задачи многодисциплинарной оптимизации;
- решение совокупности выделенных независимых подзадач оптимизации (в рамках одной или нескольких научных дисциплин);
- анализ полученных результатов.



Источник: составлено автором по данным [62, 98]

Рисунок 2.10 – Схема решения задач МДО

**Определены требования к полезности разрабатываемых технологий в двигателестроении на основе многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя. К компрессорам вертолётных двигателей предъявляются следующие требования:**

1. Максимально высокое значение КПД;
2. Достаточные запасы статической и динамической прочности;

3. Достаточные запасы газодинамической устойчивости;
4. Минимальная масса;
5. Надежность работы во всём диапазоне режимов в течении всего срока эксплуатации;
6. Ряд конструктивных требований (технологичность, ремонтопригодность и т.д.).

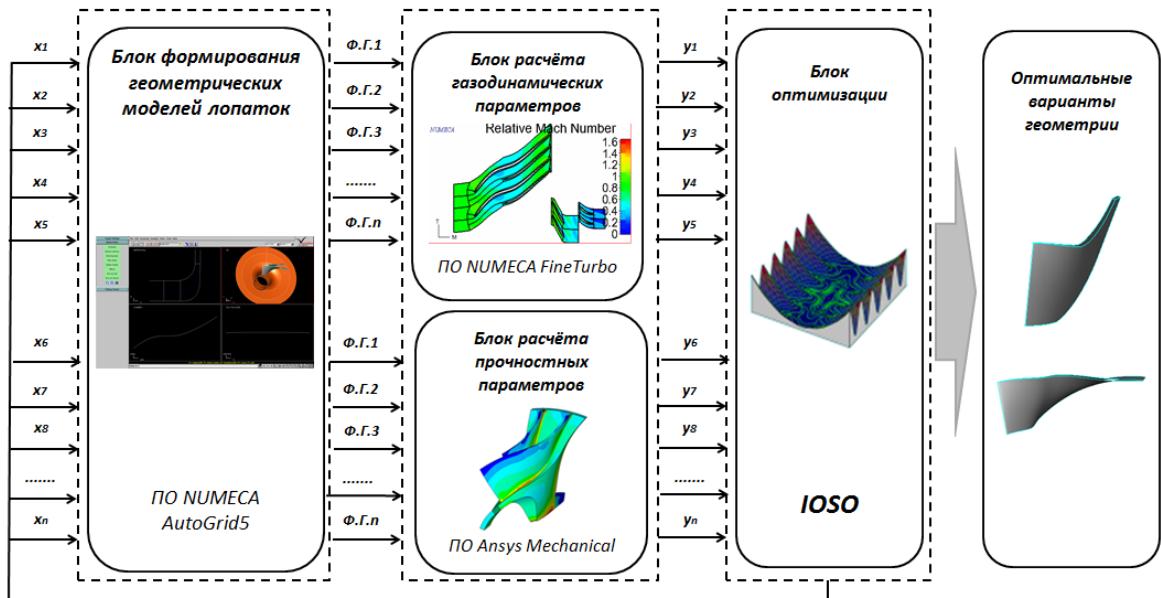
Разнообразие требований, которые предъявляются к компрессорам вертолётных двигателей, приводит к тому, что модификация конструкции с целью улучшения одних характеристик ухудшает другие. Стандартным решением этой проблемы является использование итерационного подхода, который заключается в сведении процесса проектирования к последовательному набору постановок и решений задач проектирования элементов компрессора отдельно по различным дисциплинам анализа. Главным недостатком такого подхода является его значительная трудоемкость и ухудшение качества проектирования, так как подобная процедура не рассматривает объект проектирования, как единое целое.

Целью газодинамического проектирования компрессора авиационного двигателя является поиск геометрии лопаток, обеспечивающих достаточное значение степени повышения давления, запасов устойчивой работы, требуемое значение расхода рабочего тела через компрессор при максимально высоком КПД.

Целью прочностного проектирования рабочего колеса компрессора авиационного двигателя является обеспечение статической и динамической прочности конструкции при минимально возможной массе с учетом конструктивно-технологических ограничений. Конструкция должна стablyно функционировать в течение заданного ресурса и условий эксплуатации. Прочностные требования включают обеспечение нормируемых запасов по кратковременной и длительной прочности, МЦУ, МнЦУ и несущей способности [52, 135]. При оптимизации рабочих колес необходимо учитывать требование к отстройке их частотного спектра от опасных резонансов.

В процессе поиска оптимального варианта компрессора авиационного двигателя меняется геометрия лопаток, что приводит не только к изменению

протекания газодинамических процессов в нем, но также к изменению напряженно – деформированного состояния рабочих лопаток и дисков. Вариант компрессора авиационного двигателя, оптимальный с точки зрения газовой динамики, может не удовлетворять прочностным требованиям. И наоборот, вариант компрессора, удовлетворяющий прочностным требованиям, может не удовлетворять требованиям газовой динамики. Для решения задачи доводки и проектирования компрессора авиационного двигателя была разработана технология многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации компрессора в автоматизированном режиме под управлением программы *IOSO*. Принципиальная схема разработанной технологии показана на рисунке 2.11.



Источник: составлено автором по данным [62, 94]

Рисунок 2.11 – Принципиальная схема разработанной технологии многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации центробежного компрессора

Принципиальная схема разработанной технологии состоит из нескольких блоков.

На первом этапе программа-оптимизатор *IOSO* формирует вектор входных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Значения этих параметров в автоматическом режиме записываются в текстовые файлы, описывающие геометрию лопаток в

параметрическом виде. Затем программа *NUMECAAutoBlade* считывает созданные текстовые файлы и формируют файлы  $\Phi.G.1$ ,  $\Phi.G.2$ ,  $\Phi.G.3$ , ...  $\Phi.G.n$  с геометрией лопаток в формате *geomturbo*, пригодном для *CAE*-программных комплексов *NUMECA* и *Ansys*.

На втором этапе созданный набор файлов передается в блок расчёта газодинамических параметров и блок прочностного анализа. В блоке расчёта газодинамических параметров созданные на предыдущем этапе файлы геометрии  $\Phi.G.1$ ,  $\Phi.G.2$ ,  $\Phi.G.3$ , ...  $\Phi.G.n$  загружаются в расчётную сетку в программном комплексе *NUMECAAutoGrid5*, которая в дальнейшем используется для расчёта газодинамических параметров рабочего процесса компрессора авиационного двигателя на требуемых режимах работы в программном комплексе *NUMECA FineTurbo*. После расчёта формируется файл, содержащий значения выходных параметров, таких как степень повышения давления рабочего тела  $\pi_k^*$ , КПД  $\eta_k^*$ , расхода рабочего тела  $G$ , и других.

В блоке расчёта прочностных параметров, на основе файлов геометрии  $\Phi.G.1$ ,  $\Phi.G.2$ ,  $\Phi.G.3$ , ...  $\Phi.G.n$  создается КЭ сеть модифицированных лопаток рабочих колёс и диска, затем осуществляется расчёт их прочностного состояния в программном комплексе *Ansys Mechanical*. После расчёта формируется текстовый файл, содержащий рассчитанные параметры прочностного состояния рабочего колеса компрессора авиационного двигателя.

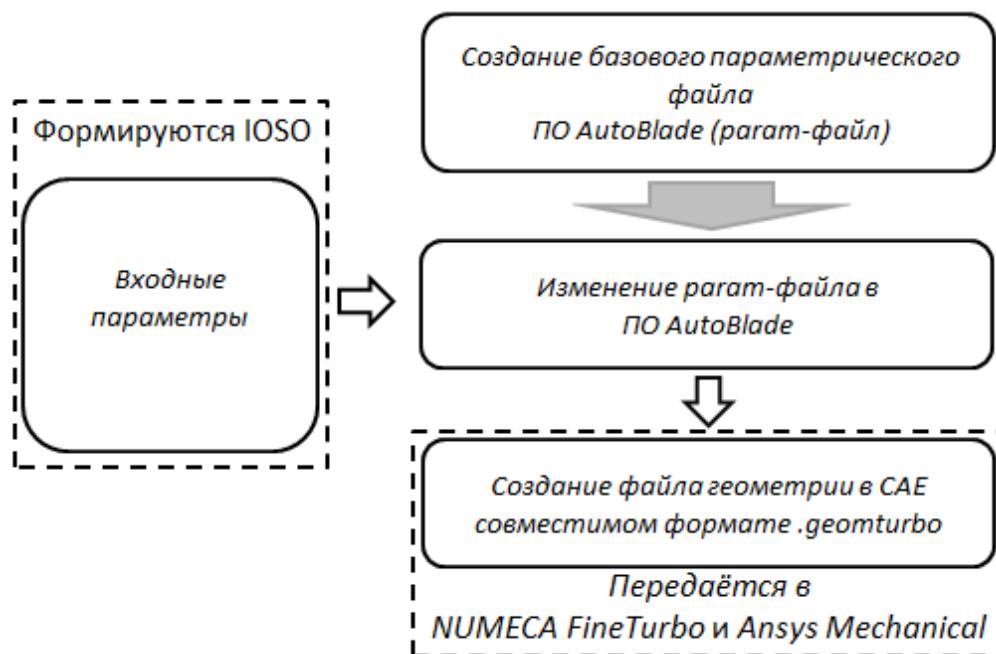
На основе текстовых файлов, содержащих значения рассчитанных параметров рабочего процесса и прочностного состояния компрессора авиационного двигателя программным комплексом *IOSO* формируется вектор выходных параметров и ограничений  $y1, y2, y3, \dots, yn$ , производится обработка полученных результатов, выбираются оптимальные варианты компрессора авиационного двигателя, а затем формируется новый набор входных параметров  $x1, x2, x3, \dots, xn$ .

Данный процесс является итеративным и выполняется до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые параметры рабочего процесса компрессора авиационного двигателя.

## Технология формирования геометрических моделей лопаток компрессора авиационного двигателя

Блок формирования геометрических моделей лопаток компрессора авиационного двигателя (рисунок 2.12) предназначен для автоматизированного создания файлов, содержащих информацию о геометрии лопаток в формате *geomturbo*, совместимом с программными комплексами *NUMECA FineTurbo* и *Ansys Mechanical*.

Исходными данными для построения параметрических геометрических моделей лопаток являются чертежи рабочего колеса. В программном комплексе *NUMECA AutoBlade* создаётся параметрическая геометрическая модель лопаток компрессора авиационного двигателя (текстовые файлы формата *param*). Для изменения формы лопаток необходимо в данных текстовых файлах изменить значения одного или нескольких геометрических параметров. В процессе оптимизации указанное изменение параметров выполняется оптимизатором *IOSO* на каждом шаге оптимизации, при «ручной» доводке – самим пользователем в любом тестовом редакторе, например, программе «Блокнот».



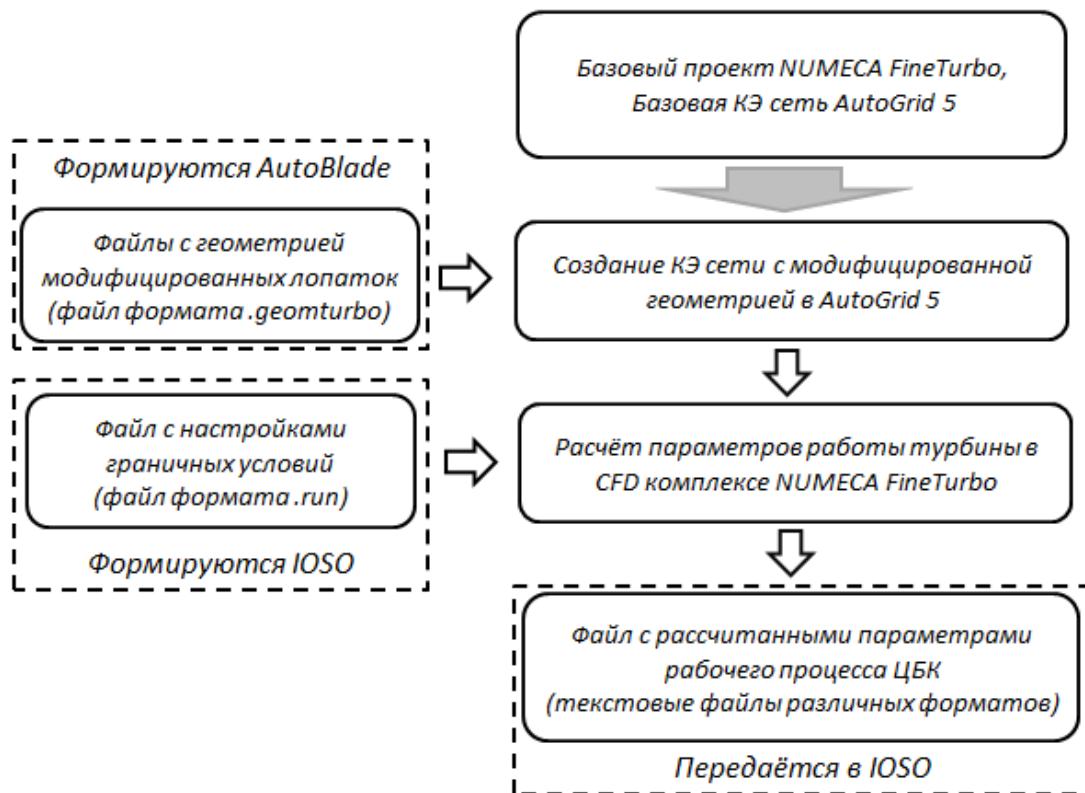
Источник: составлено автором по данным [62, 82]

Рисунок 2.12 – Схема работы блока формирования геометрических моделей

В программном комплексе *NUMECA AutoBlade* для параметризации геометрии лопаток и их перепрофилирования используется метод, основанный на деформации средней линии профилей.

### **Элемент технологии - расчёт газодинамических параметров компрессора авиационного двигателя**

Блок расчёта газодинамических параметров (рисунок 2.13) предназначен для получения файла с параметрами рабочего процесса компрессора авиационного двигателя на требуемых режимах работы.



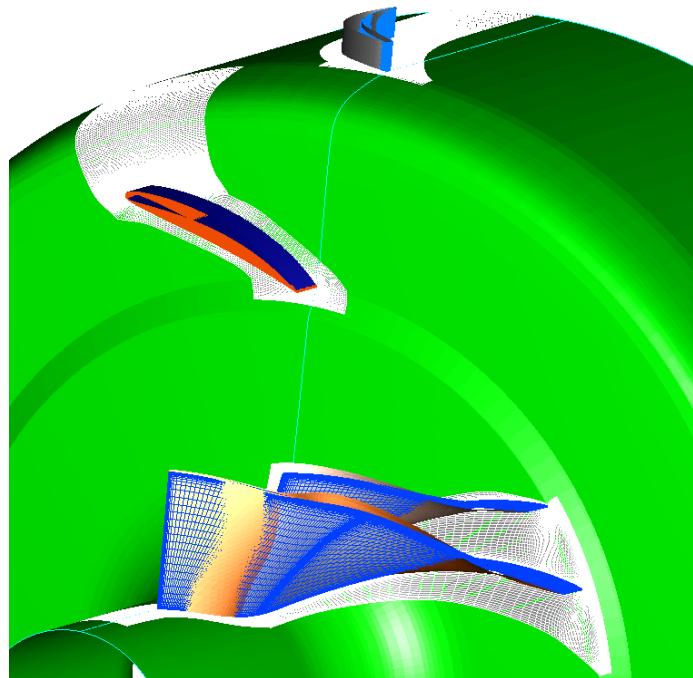
*Источник: составлено автором по данным [85, 133]*

Рисунок 2.13. – Схема работы блока расчёта газодинамических параметров

Внутри блока расчёта газодинамических параметров осуществляется следующая последовательность действий:

С помощью специализированных скриптов выполняется загрузка изменённых лопаток в сеткопостроитель *NumeccaAutoGrid5*. Далее в программном комплексе *NumeccaAutoGrid5* автоматически создаётся и сохраняется расчётная сетка.

Пример базовой и измененной геометрии центробежного компрессора, созданной на этапе расчёта газодинамических параметров и загруженный в программный комплекс *NUMECA AutoGrid 5* показан на рисунке 2.14.



*Источник: составлено автором по данным [54, 132]*

Рисунок 2.14 – Пример сравнение базовой и измененной геометрии центробежного компрессора в *NUMECA AutoGrid*

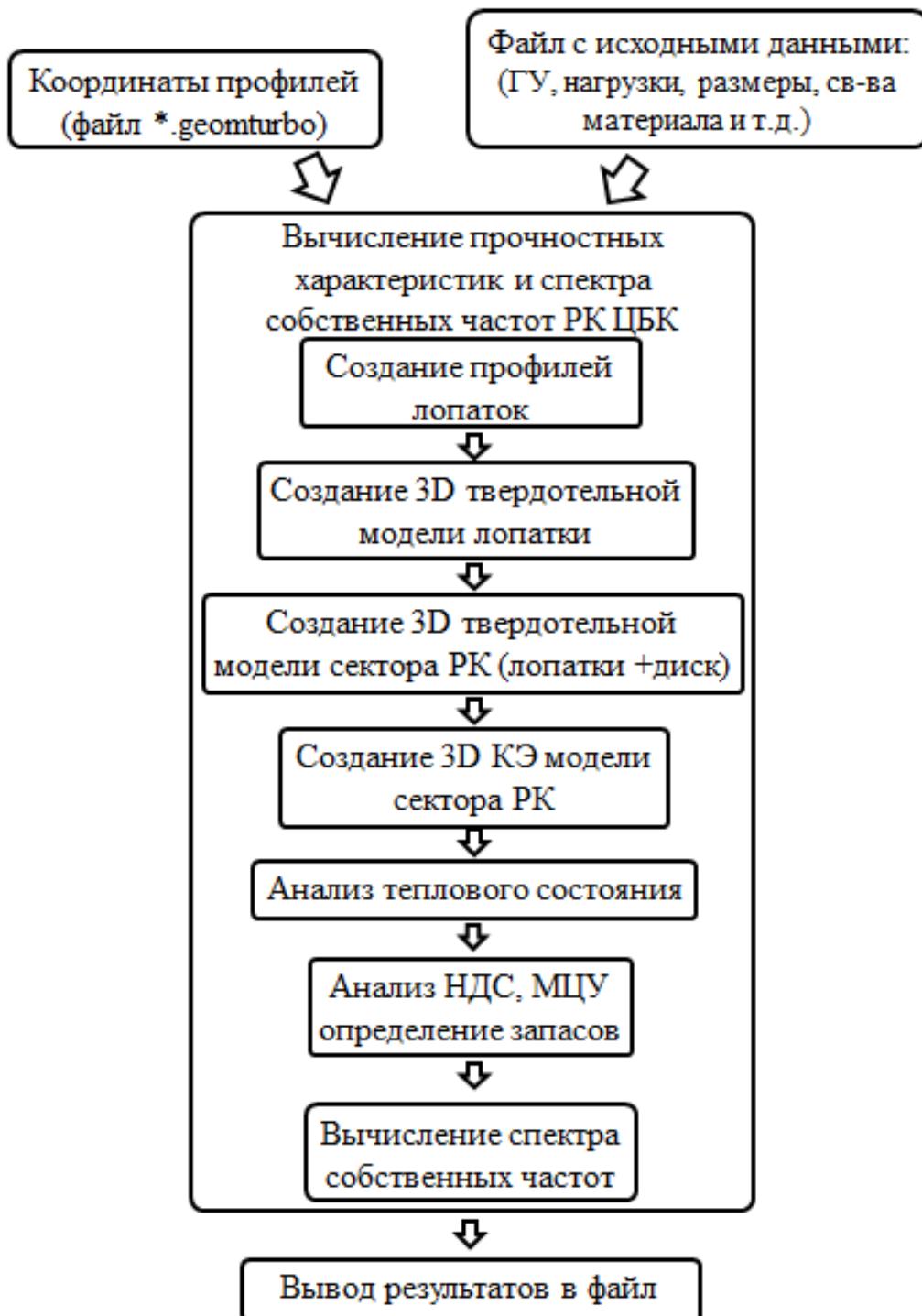
Затем созданная расчётная сетка загружается в программный комплекс *NUMECA FineTurbo*, где выполняется расчёт численной модели с использованием расчётной сетки, построенной в программном комплексе *NUMECA AutoGrid 5*. В результате расчёта определяются интегральные параметры компрессора авиационного двигателя, которые передаются в оптимизатор *IOSO*, а также поля распределения давлений и температур по поверхности лопаток. Данные поля могут передаваться передаются в программный комплекс *ANSYS Mechanical* для прочностных расчётов.

#### **Элемент технологии - расчёт прочностных параметров компрессора авиационного двигателя**

Блок расчёта прочностных параметров компрессора авиационного двигателя предназначен для оценки прочностных характеристик и спектра

собственных частот оптимизируемого рабочего колеса на каждой итерации оптимизации без участия пользователя

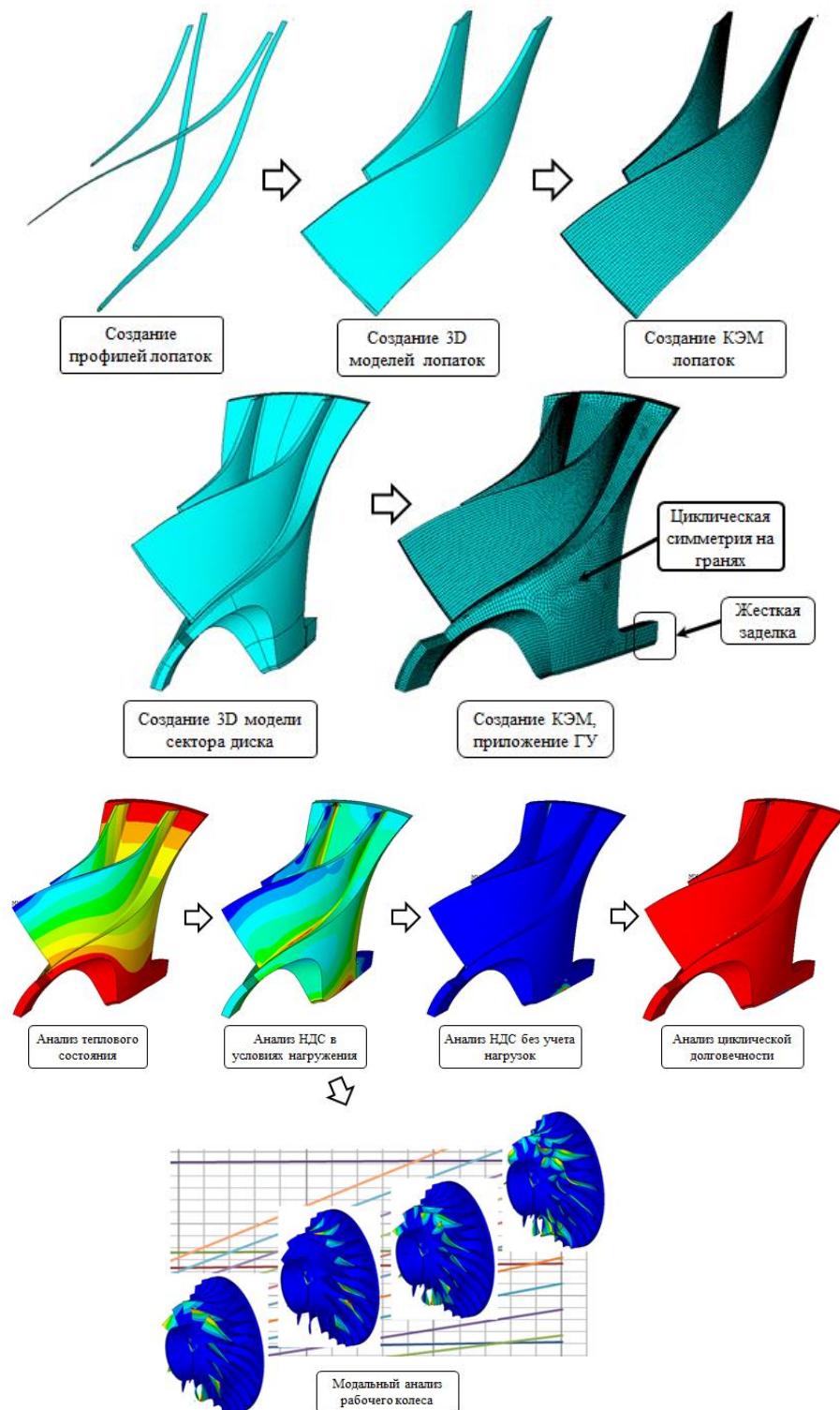
Процесс создания и анализа расчетной модели приведен на рисунке 2.15.



*Источник: составлено автором по данным [62, 99]*

Рисунок 2.15 – Схема работы блока, отвечающего за анализ прочности

А процесс создания и анализа расчетной модели представлен на рисунок 2.16.



*Источник: составлено автором по данным [133]*

Рисунок 2.16 – Процесс создания и анализа расчетной модели

В результате работы прочностного блока создаётся текстовый файл с основными параметрами, характеризующими прочностную и динамическую

прочность рабочего колеса компрессора авиационного двигателя. Данные параметры передаются в программу – оптимизатор *IOSO*.

### **Итоговый элемент технологии - программа – оптимизатор *IOSO* для многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя**

Описанные элементы технологии интегрируются в программу-оптимизатор *IOSO*.

На каждом шаге оптимизации программа – оптимизатор *IOSO* выполняет формирование новых файлов входных параметров, запускает все численные модели и программные комплексы (и газодинамические, и прочностные), а затем выполняет считывание из созданных файлов выходных параметров требуемых параметров, характеризующих рабочий процесс и прочностное состояние компрессора авиационного двигателя. В результате выполнения оптимизации формируется множество Парето (множество не улучшаемых компромиссных решений между выбранными критериями). Стоит отметить, что каждой точке множества Парето соответствует свой уникальный набор входных параметров (своя уникальная геометрия компрессора). Таким образом, необходимо оценить полезность разработанной технологии для науки и ВТП, где она применяется с учётом рисков.

На основании проведённого выше исследования КЗ технологии-совершенствования авиационного двигателя посредством многокритериальной оптимизации компрессора двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины определены параметры полезности КС технологии и рисков (таблица 2.1 – 2.3).

Таблица 2.1 – Параметры полезности КС технологии для науки

<b>Параметры полезности технологии совершенствования ГТД для науки и техники</b>	
КПД	
Изменение системы охлаждения	
Повышение устойчивости переключения степени двухконтурности на разных режимах полета	
Повышение экономичности двигателя	
Увеличение тяги двигателя при минимальном расходе топлива с ростом высоты	
Улучшение подачи кислорода в прямоточный контур на больших высотах полета летательного аппарата	
Огласование работы секций компрессоров и турбины за счет регулирования реактивного сопла и изменения площади проходного сечения смесительной камеры	
Изменение количества воздуха, проходящего через второй контур двигателя, возможность использовать части воздуха из него для охлаждения горячей части двигателя (при максимальных нагрузках двигателя)	
Применение укороченной высокотемпературной КС, подобной камерам сгорания, используемым в ракетных двигателях космической техники, которая позволяет увеличить количество сжигаемого топлива, и, соответственно, повысить тягу до уровней, которые в настоящее время требуют перехода на форсажные режимы работы силовой установки	
Возможность увеличения количества сжигаемого топлива, и, соответственно, повышения тяги до уровней, которые требуют перехода на форсажные режимы работы силовой установки	
Возможность СУ обеспечивать устойчивое переключение степени двухконтурности на разных режимах полета. За счет возможности переключения двигателя между режимами и будет достигаться топливная эффективность	
Снижение потребления топлива (при полете на крейсерской дозвуковой скорости «третий воздушный контур» может быть открыт)	
Улучшение топливной эффективности (например, за счет создание адаптивного трехконтурного двигателя)	
Снижение удельного расхода топлива при длительном крейсерском полете с дозвуковой скоростью и барражировании	
Повышение уровня удельной тяги на разнообразных боевых режимах, включая короткий взлет и посадку, сверхзвуковой полет, боевое маневрирование, перехват и др.	
Улучшение согласования работы секций компрессоров и турбины (например, за счет регулирования реактивного сопла и изменения площади проходного сечения смесительной камеры при увеличении скорости полета летательного аппарата выше сверхзвуковой при последовательном отключении ступеней компрессора, начиная с секции дополнительного компрессора низкого давления до последней ступени основного компрессора, и включение прямоточного контура)	
Изменение тяги для совершения крейсерского полета в широком диапазоне скоростей и высот полета	
Снижение удельного расхода топлива при дозвуковых скоростях полета (путем изменения степени повышения давления в вентиляторе и расхода воздуха в газогенераторе при сохранении величины температуры газа перед турбиной)	
Оптимизация теплового регулирования интегрированной системы охлаждения силовой установки и самолета, снижение уровня заметности	
Отборы воздуха на улучшение аэродинамических характеристик самолета, для поддержания постоянного расхода воздуха на входе в двигатель при его дросселировании (для повышения степень двухконтурности и тем самым экономичности двигателя)	
Снижение лобового сопротивления воздухозаборника по жидкой линии	
Повышение уровня удельной тяги на разнообразных боевых режимах, включая короткий взлет и посадку, сверхзвуковой полет, боевое маневрирование, перехват и др..	
Согласование входного устройства, двигателя и выходного устройства в составе силовой установки многоцелевого сверхзвукового самолета	

Источник: составлено автором

Таблица 2.2 – Факторы риска технологии для науки

<b>Факторы риска технологии совершенствования ГТД</b>
Температура
Посадочная дистанция
Траектория взлёта
Набор высоты
Вибрация и бафтинг
Шум
Нагрузки
Прочность и деформация .

*Источник: составлено автором*

Таблица 2.3 – Факторы риска технологии совершенствования ГТД

<b>Параметры полезности технологии для ВТП</b>	<b>Факторы риска при реализации технологии в ВТП</b>
Масса	
Скорость	Риск ухудшения летных характеристик
Высота	Риск ухудшения надёжности
Манёвренность	Риск ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП
Летные характеристики	Риск ухудшения общих характеристик
Надёжность	
Характеристики систем, обеспечивающих управление ВТП	
Общие характеристики	

*Источник: составлено автором*

На основе проведенного анализа **технологии совершенствования ГТД**

Разработан методический подход к оценке полезности разработки критических и сквозных технологий (на примере двигателестроения) на основе анализа внутренних и внешних факторов риска посредством нейросетевого моделирования (таблица 2.4):

Таблица 2.4 – Методический подход оценки полезности разработки критических и сквозных технологий (на примере двигателестроения)

<b>1. Аналитический этап</b>	
Анализ нормативной правовой базы и методик оценки разработки и реализации КС технологий	
Анализ Характеристик ВТП : - Тип двигателя - Расход воздуха - Тяга - Относительный расход топлива - Мощность	Формирование баз данных по композитным материалам
Анализ требований по улучшению характеристик двигателей	Формирование баз данных по технологиям, оборудованию

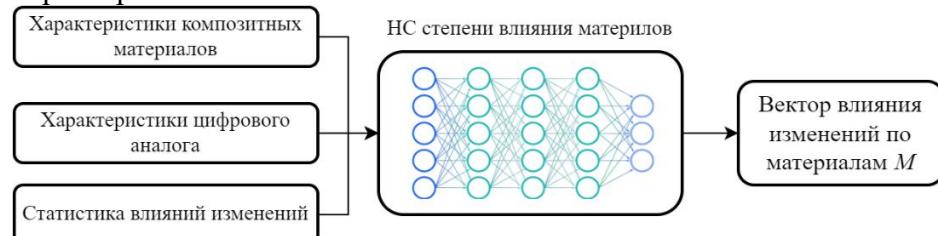
Таблица 2.4 – Методический подход оценки полезности разработки критических и сквозных технологий (на примере двигателестроения)  
(продолжение)

**2. Этап. Разработка КС технологии посредством физико-математического моделирования, формирование цифровых аналогов**

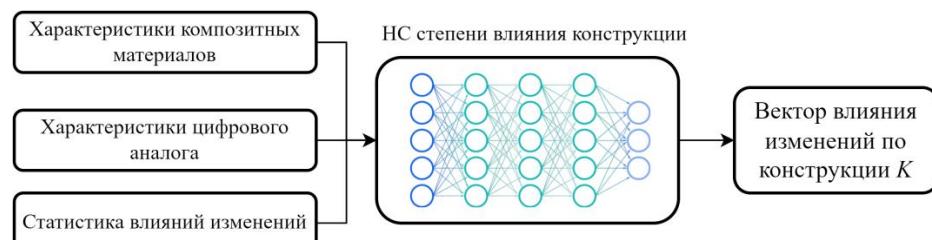
Цифровое моделирование использования композитных материалов, комплектующих. Формирование пространства цифровых аналогов двигателя.

**Оценка влияния изменения материалов, конструкции ЦД на характеристики двигателя при помощи комплекса нейросетевых моделей**

Нейросетевое моделирование степени влияния изменений по материалам на лётные характеристики:



Нейросетевое моделирование влияния изменений по комплектующим на лётные характеристики:



**3 Этап Оценка полезности разработки КС технологии с учётом рисков для науки и техники**

Оценка компонент полезности разработанной КС технологии двигателестроения  $\Pi_{\text{нт}}_i(X)$

КПД  
Изменение системы охлаждения  
Повышение экономичности двигателя  
Увеличение тяги двигателя при минимальном расходе топлива с ростом высоты  
Снижение удельного расхода топлива  
Снижение лобового сопротивления воздухозаборника и др.

Оценка факторов риска разработки КС технологии в двигателестроении  $R_{\text{нт}}_i(X)$

Температура  
Посадочная дистанция  
Траектория взлёта  
Набор высоты  
Вибрация и бафинг  
Шум  
Нагрузки  
Прочность и деформация .  
Расчетные веса и положения центра тяжести и др.

**Определение показателя полезности разработанной КС технологии для науки и техники  $\Pi_{\text{нт}}(X)$**

$$\Pi_{\text{нт}}(X) = \sqrt[n^1]{\prod_{i=1}^{n^1} \Pi_{\text{нт}}_i(X)}$$

$\Pi_{\text{нт}}_i(X)$  – экспертная оценка i компоненты полезности разработанной КС технологии

**Определение уровня риска разработанной КС технологии для науки и техники  $R_{\text{нт}}(X)$**

$$R_{\text{нт}}(X) = \sqrt[m^1]{\prod_{i=1}^{m^1} R_{\text{нт}}_i(X)}$$

$R_{\text{нт}}_i(X)$  – экспертная оценка i фактора риска разработанной КС технологии двигателестроения в соответствии с разработанной шкалой

<p>двигателестроения для науки и техники в соответствии с разработанной шкалой  <math>n_1</math>- число компонент полезности разработанной КС технологии для науки и техники;  X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>	$m_1$ - число факторов риска разработанной КС технологии для науки и техники; X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);					
<p><b>Оценка полезности разработанной КС технологии для науки и техники Пнт(X) в соответствии с разработанной шкалой</b></p>	<p><b>Оценка уровня риска разработки КС технологии для науки и техники Рнт(X) в соответствии с разработанной шкалой</b></p>					
<p><b>Определение и оценка показателя полезности разработки КС технологии для науки и техники с учётом риска в соответствии с разработанной шкалой ПРнт(X)</b></p>						
$\text{ПРнт}(X) = \text{Пнт}(X) * \text{Рнт}(X)$						
<p>Оценка полезности</p>	<p>отрицательная</p>	<p>без изменения</p>	<p>низкая</p>	<p>средняя</p>	<p>выше среднего</p>	<p>высокая</p>
<p>Значение показателя полезности</p>	<p>[0,7;1)</p>	<p>1</p>	<p>(1;1,15)</p>	<p>[1,15;1,35)</p>	<p>[1,35;1,55)</p>	<p>[1,55;1,7]</p>
<p><b>4 Этап. Оценка полезности разработанной КС технологии для характеристик ВТП с учётом рисков</b></p>						
<p>Оценка параметров полезности КС технологии для характеристик ВТП</p>	<p>Оценка факторов риска при реализации КС технологии в ВТП</p>					
<p>Масса  Скорость  Манёвренность  Летные характеристики  Надёжность  Характеристики систем, обеспечивающих управление ВТП и др.</p>	<p>Риск ухудшения летных характеристик  Риск ухудшения надёжности  Риск ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП  Риск ухудшения общих характеристик и др.</p>					
<p>Определение показателя полезности КС технологии для характеристик ВТП Пп(X)</p>	<p>Определение уровня риска КС технологии для характеристик ВТП Рп(X)</p>					
$\text{Пп}(X) = \sqrt[n_2]{\prod_{i=1}^{n_2} \Pi_{p_i}(X)}$	$\text{Рп}(X) = \sqrt[m_2]{\prod_{i=1}^{m_2} R_{p_i}(X)}$					
<p><math>\Pi_{p_i}(X)</math> –экспертная оценка i компоненты полезности разработанной КС технологии двигателестроения для характеристик ВТП в соответствии с разработанной шкалой  <math>n_2</math>- число компонент полезности разработанной КС технологии для характеристик ВТП;  X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>	<p><math>R_{p_i}(X)</math> –экспертная оценка i фактора риска разработанной КС технологии двигателестроения для характеристик ВТП в соответствии с разработанной шкалой  <math>m_2</math>- число факторов риска разработанной КС технологии для характеристик ВТП;  X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>					
<p><b>Оценка полезности КС технологии для характеристик ВТП в соответствии с разработанной шкалой Пп(X)</b></p>	<p><b>Оценка уровня риска КС технологии для характеристик ВТП в соответствии с разработанной шкалой Рп(X)</b></p>					

**Определение и оценка показателя полезности разработки КС технологии для характеристик ВТП с учётом рисков в соответствии с разработанной шкалой ПРп(Х)**  
 $\text{ПРп}(X) = \text{Пп}(X) * \text{Рп}(X)$

Оценка риска	Снижение риска	риск без изменений	увеличение риска ниже среднего	среднее увеличение риска	высокое увеличение риска	критическое увеличение риска
Значение показателя уровня риска	(1;1,2]	1	(1;0,95)	[0,95;0,85)	[0,85;0,75)	[0,75;0,7]

*Источник: составлено автором*

### 2.3 Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении

В диссертации изучены методы оценки технологий с использованием моделей, которые позволяют количественно определить уровень зрелости, эффективность, риски и потенциал внедрения новых технологий. Ниже представлены основные подходы и формулы, применяемые для оценки технологий:

Метод оценки технологической зрелости (Technology Readiness Level — TRL) [37, 38]. Оценка по шкале от 1 до 9, где 1 — начальные исследования, а 9 — готовность к массовому производству. Используется для определения стадии развития технологии и планирования дальнейших этапов.

Метод оценки стоимости жизненного цикла (Life Cycle Cost — LCC). Расчет всех затрат на разработку, внедрение и эксплуатацию технологии [38].

$$\text{LCC} = IC + \sum_{i=1}^n \frac{OC_t}{(1+r)^t} \quad (2.1)$$

где:

$IC$  — начальные инвестиции,

$OC_t$  — операционные расходы в году  $t$ ,

$r$  — ставка дисконтирования,

$n$  — срок эксплуатации.

**Метод оценки эффективности (ROI — Return on Investment).** Расчет окупаемости инвестиций в технологию [39, 42].

$$ROI = \frac{\text{Инвестиции в технологию}}{\text{Чистая прибыль от технологии}}$$

$$\times 100\% \quad (2.2)$$

**Модель оценки инновационного потенциала (Индекс инновационной эффективности).** Объединяет показатели новизны, рыночного спроса и технологической реализуемости [32,55].

$$IPE = w_1 N + w_2 S + w_3 R \quad (2.3)$$

где:

$N$  — уровень новизны,

$S$  — рыночный спрос,

$R$  — реализуемость;

$w_1, w_2, w_3$  — веса, отражающие важность каждого показателя.

**Модель оценки риска внедрения (Risk Assessment Model).** Использует вероятности возникновения рисков и их последствия для определения общего риска [42,55].

$$RAM = \sum_{i=1}^m C_i * P_i \quad (2.4)$$

где:

$P_i$  — вероятность возникновения риска  $i$ ,

$C$  — последствия риска  $i$ .

Для комплексной оценки технологий используют комбинацию этих методов и моделей, адаптируя их под специфику проекта и отрасли. Важным является также использование экспертных оценок и сценарных анализов для уточнения количественных показателей.

Процесс разработки и реализации критических и сквозных технологий можно рассматривать как проект, следовательно, возможно для оценки эффективности применять критерии оценки эффективности проектов (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Показатели эффективности инвестиционного проекта (ИП)

Название показателя	Формула для расчета	Вспомогательные формулы
Чистая приведенная стоимость для ИП в целом ( $NPV_{project}$ )	$NPV_{project} = \sum_{n=1}^N \frac{FCFF_n}{(1+r)^n} + \frac{TV_{projectN}}{(1+r)^N}$ <p> <math>FCFF_n</math> – ДП ИП;  <math>n</math> – номер;  <math>N</math> – количество периодов;  <math>TV_{projectN}</math> – прогноз денежного потока;  <math>r</math> – ставка дисконтирования.         </p>	$1. FCFF = NI + \Delta WC + D\&A - NCI + + \left(1 - \frac{Tax}{100}\right) \cdot NIP + ICF$ <p> <math>NI</math> – прибыль;  <math>D\&amp;A</math> – амортизация;  <math>Tax</math> – налог на прибыль;  <math>NIP</math> – платежи по процентам;  <math>ICF</math> – ДП от инвест. деятельности;  <math>NCI</math> – прибыль от реализации;  <math>\Delta WC</math> – изменение оборотного капитала;  <math>ICF = -CI + k</math>  <math>CI</math> – инвестиции;  <math>k</math> – средства продажи:  <math display="block">k = S - \frac{Tax}{100} \cdot (S - B)</math> <math>S</math> – цена активов;  <math>B</math> – стоимость на момент продажи основных средств          Прогнозная стоимость:  <math display="block">TV_{projectN} = \frac{FCFF_N(1+g)^n}{(r-g)^n}</math> </p>

Таблица 2.5 – Показатели эффективности инвестиционного проекта (ИП)  
(продолжение)

Название показателя	Формула для расчета	Вспомогательные формулы
Внутренняя норма доходности ИП	$\sum_{n=1}^N \frac{FCFF_n}{(1 + IRR_{project})^n} + \frac{TV_{projectN}}{(1 + IRR_{project})^N} = 0$	
Период окупаемости	$PBP = n - \frac{\sum_{t=0}^n FCFt}{FCFF_{n+1}}$	
Дисконтированный период окупаемости	$DPBP = n - \frac{\sum_{t=0}^n \frac{FCFF_t}{(1+r)^t}}{\frac{FCFF_{n+1}}{(1+r)^{n+1}}}$	
Коэффициент эффективности	$PI_{project} = \frac{NPV_{project}}{I_{project}}$	$I_{project}$ – сумма первоначальных вложений в инвестиционный проект

Источник: составлено автором по данным [34, 46, 48, 50]

В диссертации проведён анализ методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости

высокотехнологичной продукции утверждённых Приказом Минэкономразвития России от 10.04.2025 N 222. Методические рекомендации включают рекомендации для формирования методик расчета показателей национальных проектов по обеспечению технологического лидерства (НПТЛ) [20, 28]. Высокотехнологичная продукция, высокотехнологичные результаты работ услуг, в сфере развития технологий - разработанные и произведенные на основе критичных, сквозных технологий с использованием передовых научных и технических достижений и инновационных методов товары, работы и услуги в сфере развития технологий. Уровень технологической независимости высокотехнологичной продукции - показатель, характеризующий степень соответствия уровней готовности технологий и уровней готовности производства высокотехнологичных продуктов, критичных элементов, комплектующих и материалов целевым значениям в рамках номенклатуры высокотехнологичных продуктов [20, 28].

Дополнительно при принятии решения о критичности следует учитывать следующие факторы:

- доступность импорта - принадлежность 50 процентов и более (в стоимостном выражении) ввозимой продукции данного типа группам стран с существенными ограничениями (официальные поставки невозможны или необходим параллельный импорт);
- доля импорта - доля импорта (в стоимостном выражении) продукции данного типа в общем объеме потребления продукции данного типа в РФ превышает пороговое значение (пороговое значение определяется квалифицированным заказчиком, исходя из специфики продукции);
- высокий риск дальнейшей утери возможности приобретения продукции в других странах (экспертную оценку уровня риска следует проводить в том числе на основании данных об объеме заключенных внешнеэкономических контрактов и прогнозируемых показателей объема импорта продукции);
- степень развития внутренней производственно-технологической базы и ресурсной базы [20, 28].

Уровень технологической независимости высокотехнологичной продукции

для НПТЛ в соответствии рассчитывается по формуле [20, 28]:

$$\Pi_{TH} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{GTi} + \sum_{j=1}^m Y_{GPIj}}{2} \times 100\%, \quad (2.5)$$

где:

$\Pi_{TH}$  - уровень технологической независимости высокотехнологичной продукции, принимающий значения от 0 до 100 процентов, где значение 100 процентов характеризует наличие всех необходимых технологий и производственных мощностей для обеспечения возможности производства всех высокотехнологичных продуктов, их критических элементов, комплектующих и материалов;

$Y_{GTi}$  - уровень готовности Технологии  $i$ , необходимой для создания соответствующих высокотехнологичных продуктов, их критических элементов, комплектующих и материалов, принимающий значение от 1 до 9 на конец отчетного периода;

$Y_{GPIj}$  - уровень готовности производства высокотехнологичного продукта, его критического элемента, комплектующего и материала  $j$ , принимающий значение от 1 до 10 на конец отчетного периода;

$n$  - количество недостающих технологий, необходимых для создания соответствующих высокотехнологичных продуктов, их элементов, комплектующих и материалов, определенных в рамках НПТЛ;

$m$  - количество высокотехнологичных продуктов, их критических элементов, комплектующих и материалов, определенных в рамках НПТЛ.

Правилами определения показателей эффективности мер и инструментов государственной политики в области научно-технологического развития РФ утверждёнными Постановлением Правительства РФ от 28.04.2025 N 571 установлены следующие показатели :

Отдельный (целевой) показатель определяется как "Внутренние затраты на

исследования и разработки за счет всех источников в текущих ценах, в процентах валового внутреннего продукта" ( $B3_{BVP}$ ) по формуле [17]:

$$B3_{BVP} = \frac{B3IR}{BVP} \times 100\%, \quad (2.6)$$

где:

$B3IR$  - внутренние затраты на исследования и разработки за счет всех источников в текущих ценах (млрд. рублей);

$BVP$  - валовой внутренний продукт в текущих ценах (млрд. рублей).

Показатель "Место РФ в мире по объему научных исследований и разработок" ( $M_{P\Phi}$ ) определяется по формуле [17, 20]:

$$M_{P\Phi} = \frac{M_{OECR}^{P\Phi} + M_{B3IR}^{P\Phi}}{2}, \quad (2.7)$$

где:

$M_{OECR}^{P\Phi}$  - место РФ по численности исследователей в эквиваленте полной занятости среди ведущих стран мира (место);

$M_{B3IR}^{P\Phi}$  - место РФ по объему затрат на научные исследования и разработки (место).

Показатель "Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте РФ" ( $S_1$ ) определяется по формуле [17, 20]:

$$S_1 = \frac{VA_{ht} + VA_{mt} + VA_{ki}}{VA_T} \times 100\%, \quad ((2.8))$$

где:

$VA_{ht}$  - валовая добавленная стоимость высокотехнологичных отраслей в основных текущих ценах (млрд. рублей);

$VA_{mt}$  - валовая добавленная стоимость среднетехнологичных отраслей высокого уровня в основных текущих ценах (млрд. рублей);

$VA_{ki}$  - валовая добавленная стоимость наукоемких отраслей в основных текущих ценах (млрд. рублей);

$VA_T$  - совокупная валовая добавленная стоимость всех отраслей страны в основных текущих ценах (млрд. рублей).

Показатель "Удельный вес отечественных высокотехнологичных товаров и услуг, созданных на основе собственных линий разработки, в общем объеме потребления таких товаров и услуг в РФ" ( $\Delta_{Onppi}$ ) определяется по формуле [17, 28]:

$$\Delta_{Onppi} = \frac{O_{втусл}}{O_{втуобщ}} \times 100\%, \quad ((2.9)$$

где:

$O_{втусл}$  - объем отечественных высокотехнологичных товаров и услуг, созданных на основе собственных линий разработки (тыс. рублей);

$O_{втуобщ}$  - общий объем потребления высокотехнологичных товаров и услуг в РФ (тыс. рублей).

Показатель "Объем реализованной продукции, созданной с использованием важнейших наукоемких технологий" (Првнт) определяется по формуле [17,20]:

$$\text{Пр}_{\text{ВНТ}} = \sum_{i=1}^n \text{Пр}_{\text{ВНТ}i}, \quad (2.10)$$

где:

$n$  - количество продукции, созданной с использованием важнейших наукоемких технологий (единиц);

$i=1$  - начальное значение количества продукции, созданной с использованием важнейших наукоемких технологий (единиц);

$Pr_{BNTi}$  - объем реализованной продукции, созданной с использованием  $i$ -й важнейшей наукоемкой технологии (млрд. рублей).

В исследованиях предлагается подход оценки эффективности технологий через коммерциализацию эффекта. Однако не всегда коммерческий эффект можно чётко оценить. В исследовании предлагается оценку разработки и реализации критических и сквозных технологий осуществлять на основе оценки полезности и риска для: науки, ВТП, использующей технологию, предприятий изготовителей ВТП, развития смежных отраслей, технологической независимости государства. В соответствии с данной гипотезой определены Параметры полезности технологии и факторы риска для предприятия, группы производителей. Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности), факторы риска в масштабах государства при реализации технологии сгруппированы в таблицах 2.6., 2.7.

Таблица 2.6 – Параметры полезности технологии для предприятия

<b>Параметры полезности технологии для предприятия, группы производителей</b>	<b>Факторы риска при реализации технологии на предприятии</b>
Требования заказчиков к ВТП, использующей технологию	сложность изменения производственной базы
Характеристики ВТП конкурентов	сложность изменения материально-технической базы
Спрос на ВТП с использованием новой технологии	сложность изменения кадровой базы
Изменение объёма реализации ВТП, использующей технологию	финансовая возможность изменения производственной базы
Финансово-экономические показатели предприятия	финансовая возможность изменения материально-технической базы
Устойчивость функционирования предприятия в текущем периоде (конкурентоспособность)	финансовая возможность изменения кадровой базы
Устойчивость функционирования предприятия в перспективном периоде (конкурентоспособность)	время изменения производственной базы
	время материально-технической базы
	время изменения кадровой базы
	риск высокой стоимости производства ВТП с использованием технологии
	риск неокупаемости производства ВТП с использованием технологии
	риск недополучения результата (не повысились объемы продаж, необходимость снижения цен)
	риск неудовлетворения требований заказчиков в перспективе (отставания от конкурентов) (низкий потенциал технологии)
	риск снижения надёжности ВТП от внедрения технологии

*Источник: составлено автором*

Таблица 2.7 – Параметры полезности технологии для государства

<b>Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности)</b>	<b>Факторы риска в масштабах государства при реализации технологии</b>
Спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях вследствие новой технологии	Экологический риск
Изменение объёма реализации на продукцию, услуги в смежных отраслях вследствие новой технологии	Финансовый риск (субсидии)
Развитие ИИ (формирование ЦД)	Риск недополучения социально-экономического эффекта от реализации технологии (налогам, занятости, привлечению инвестиций)
Увеличение занятости, создание новых направлений труда	риск узкомасштабности технологии
Увеличение налогов	Риск низкой стратегической значимости (отсутствия потенциала)
Потенциал технологии	Риск недополучения промышленного эффекта от реализации технологии (развитию смежных производств)
Снижение технологической зависимости, укрепление технологического суверенитета	Риск недополучения технологического лидерства вследствие долгого внедрения технологии
Лидерство в развитии науки и технологий с целью обеспечения национальной безопасности	Риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости
Трансформация механизмов производства и потребления, появление новых рынков товаров и услуг, изменение облика существующих отраслей экономики и технологических стандартов, повышение уровня переработки природных ресурсов, снижение энергоемкости от внедрения технологии	Риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии
Появление и востребованность новых профессий, повышение требования к уровню образования и квалификации работников.	
Способствование созданию образцов вооружения, военной и специальной техники, систем обеспечения безопасности, обладающих ранее недостижимыми характеристиками.	
Нарашивание потенциала РФ в области фундаментальных и прикладных исследований	
Способствование созданию на территории РФ благоприятной деловой среды, повышение привлекательности российской юрисдикции для российских и иностранных инвесторов, деофшоризация экономики;	

Таблица 2.7 – Параметры полезности технологии для государства (продолжение)

Обеспечение ускорения темпов прироста инвестиций в основной капитал включает в себя следующие меры: повышение доступности долгосрочного кредитования, защита и поощрение капиталовложений, а также стимуляция использования внутренних источников инвестиций.	
Обеспечение устойчивого развития реального сектора экономики включает в себя создание высокотехнологичных производств, развитие новых отраслей экономики, а также формирование рынков товаров и услуг на основе перспективных высоких технологий.	
Повышение производительности труда осуществляется через модернизацию промышленных предприятий и инфраструктуры, внедрение цифровых технологий, использование искусственного интеллекта, а также создание высокотехнологичных рабочих мест.	
Преодоление критической зависимости российской экономики от импорта технологий, оборудования и комплектующих осуществляется путем ускоренного внедрения передовых российских технологических разработок и локализации производства на территории России.	
Технологическое обновление базовых секторов экономики, таких как промышленность, строительство, связь, энергетика, сельское хозяйство и добыча полезных ископаемых, включает форсированное развитие российского машиностроения, в том числе приборостроения и станкостроения. При этом приоритетом является использование отечественной продукции при решении задач модернизации экономики.	
Развитие радиоэлектронной промышленности и производства информационных технологий, а также оборудования, необходимого для решения задач в области цифровизации экономики и государственного управления.	
Модернизация производственной базы организаций оборонно-промышленного комплекса и увеличение объемов производства высокотехнологичной продукции гражданского и двойного назначения.	
Формирование долгосрочного спроса и предложения на высокотехнологичную продукцию, создаваемую для обеспечения технологического лидерства РФ .	

*Источник: составлено автором*

Разработан формализованный методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных технологий (на примере двигателестроения) на основе показателя уровня технологической независимости таблица 2.8.

Таблица 2.8 – Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении

<b><u>Блок 1 Оценка полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков Ппр(Х)</u></b>	
Оценка компонент полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Ппр <sub>i</sub> (Х)	Оценка факторов риска реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Рпр <sub>i</sub> (Х)
Требования заказчиков к ВТП, использующей технологию Характеристики ВТП конкурентов Спрос на ВТП с использованием новой технологии Изменение объёма реализации ВТП, использующей технологию Финансово-экономические показатели предприятия и др.	Сложность, финансовая возможность, время изменения производственной базы сложность финансовая возможность, время изменения материально-технической базы риск высокой стоимости производства ВТП с использованием технологии риск неокупаемости производства ВТП с использованием технологии риск снижения надёжности ВТП от внедрения технологии и др.
<b>Определение показателя полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Ппр(Х)</b>  $\text{Ппр}(X) = \sqrt[n_1]{\prod_{i=1}^{n_1} \text{Ппр}_i(X)}$ <p>Ппр<sub>i</sub> (Х) –экспертная оценка i компоненты полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя в соответствии с разработанной шкалой n3- число компонент полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя; Х- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>	<b>Определение уровня риска реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Рпр(Х)</b>  $\text{Рпр}(X) = \sqrt[m_1]{\prod_{i=1}^{m_1} \text{Рпр}_i(X)}$ <p>Рпр<sub>i</sub> (Х) –экспертная оценка i фактора риска реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя в соответствии с разработанной шкалой m3- число факторов риска реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя; Х- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>
<b>Оценка полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Ппр(Х) в соответствии с разработанной шкалой</b>	<b>Оценка уровня риска реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя Рпр(Х) в соответствии с разработанной шкалой</b>
<b>Определение и оценка показателя полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом риска в соответствии с разработанной шкалой ПРпр(Х)</b>	$\text{ПРпр}(X) = \text{Ппр}(X) * \text{Рпр}(X)$

Таблица 2.8 – Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении (продолжение)

<b><u>Блок 2 Оценка полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков Птн(Х)</u></b>	
Оценка параметров полезности внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства $\text{Птн}_i(X)$	Оценка факторов риска внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства $\text{Ртн}_i(X)$
Спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях вследствие новой технологии Развитие ИИ (формирование ЦД) Увеличение занятости, Создание новых направлений труда Увеличение налогов Наращивание потенциала РФ в области фундаментальных и прикладных исследований Модернизация производственной базы организаций, увеличение объемов выпускаемой ВТП Обеспечение устойчивого развития реального сектора экономики, создание высокотехнологичных производств, новых отраслей экономики, рынков товаров и услуг на основе КС технологий	Риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости Риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии Риск недополучения технологического лидерства вследствие долгого внедрения технологии Риск низкой стратегической значимости (отсутствия потенциала) Риск недополучения промышленного эффекта от реализации технологии (развитию смежных производств) Экологический риск Финансовый риск (субсидии)
Определение показателя полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства Птн(Х)	Определение уровня риска внедрения КС технологии для развития смежных отраслей улучшения технологической независимости государства Ртн(Х)
$\text{Птн}(X) = \sqrt[n^4]{\prod_{i=1}^{n^4} \text{Птн}_i(X)}$ <p>Птн<sub>i</sub>(X) – экспертная оценка i компоненты полезности внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства в соответствии с разработанной шкалой  <math>n^4</math>- число компонент полезности внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства;  X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>	$\text{Ртн}(X) = \sqrt[m^4]{\prod_{i=1}^{m^4} \text{Ртн}_i(X)}$ <p>Ртн<sub>i</sub>(X) – экспертная оценка i фактора риска внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства в соответствии с разработанной шкалой  <math>m^4</math>- число факторов риска внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства;  X- вектор входных параметров (композитные материалы и др.);</p>
Оценка полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства в соответствии с разработанной шкалой Птн(Х)	Оценка уровня риска внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства в соответствии с разработанной шкалой Ртн(Х)
<b>Оценка показателя изменения технологической независимости от внедрения КС технологии с учётом рисков и экономических факторов в соответствии с разработанной шкалой ПРтн(Х)</b>	
$\text{ПРтн}(X) = \text{Птн}(X) * \text{Ртн}(X)$	

Таблица 2.8 – Методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных КС технологий (на примере двигателестроения) (продолжение)

**7. Этап. Комплексная оценка разработки и реализации критических и сквозных КС технологий (на примере двигателестроения) в соответствии с разработанной шкалой (ПРРТ(Х))**

$$\text{ПРРТ}(X) = \text{ПРнт}(X) * B_1 + \text{ПРп}(X) * B_2 + \text{ПРпр}(X) * B_3 + \text{ПРтн}(X) * B_4$$

$B_i$ - значимость для оценки полезности разработки КС технологии для науки и техники, для характеристик ВТП, финансово-экономических показателей предприятия производителя, изменения технологической независимости государства от внедрения КС технологии с учётом рисков и экономических факторов. Определяется экспертным путём.

Шкала показателя изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов

Оценка изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов, комплексной оценки	отрицательная	без изменений	низкая	средняя	выше среднего	высокая
Значение показателя изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов, комплексной оценки	менее 1	1	(1;1,15)	[1,15;1,35]	[1,35;1,55]	более 1,55

*Источник: составлено автором*

Разработанные показатели оценки полезности разработки КС технологии для науки и техники, полезности для ВТП, предприятий изготовителей с учётом рисков, оценки полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков, а также показатель комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных КС технологий целесообразно использовать для управления системой разработки и реализации КС технологий, обоснования финансирования на разработку и реализацию, прогнозирования уровня технологического развития в отрасли двигателестроения с учётом экономических факторов и рисков.

Разработанные показатели полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом риска, изменения технологической независимости от внедрения КС технологии с учётом рисков и экономических факторов рекомендуется применять наряду с критериями, чистой приведённой стоимости, индекса доходности, периода окупаемости [72]. Для разработанной КС

технологии бывают ситуации, когда все известные критерии негативные, но разработанная продукция имеет высокую стратегическую целесообразность, то есть, вследствие положительного изменения лётных характеристик из-за использования новых материалов, конструкций, технологий будет конкурентоспособна, даст конкурентные преимущества в современных экономических, политических условиях на определённом временном интервале.

## **2.4 Структура экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении**

При изучении различных процессов и алгоритмов в научных исследованиях часто употребляются термины "экономический механизм", "организационно-экономический механизм". Экономический механизм — это совокупность методов, форм, инструментов и организационных структур, предназначенных для регулирования хозяйственной деятельности с целью достижения определенных экономических целей. Он обеспечивает эффективное использование ресурсов, стимулирование производства и потребления, а также управление экономическими процессами в рамках действующей системы.

Основные компоненты экономического механизма включают:

Цели и задачи — определение приоритетных направлений развития экономики или ее сегментов.

Инструменты регулирования — рыночные (цены, конкуренция, спрос и предложение), административные (государственное регулирование, налоги, субсидии), финансовые (кредитование, бюджетная политика).

Организационные структуры — органы власти, регулирующие и контролирующие деятельность субъектов экономики.

Правовые основы — нормативно-правовые акты, регулирующие экономические отношения.

Механизмы стимулирования — налоговые льготы, штрафы, субсидии, тарифы и другие меры для мотивации участников рынка.

В целом, экономический механизм обеспечивает системное взаимодействие всех элементов хозяйственной системы для достижения поставленных целей с учетом текущих условий и ресурсов.

М.Ю. Осипов определяет экономический механизм как систему структур, содействующих созданию, развитию и совершенствованию производственных систем [56]. В работах Жуковой И.В. организовано-экономический механизм описывается как совокупность методов экономического, административно-правового и организационного воздействия на управляемый объект [122]. В трудах Л. Гурвица понятие «механизм» трактуется как взаимодействие между центром и субъектами, проходящее через три этапа: индивидуальное сообщение от субъекта к центру; центр вычисляет ожидаемый результат; центр объявляет результат и воплощает его в реальность [136]. В данном диссертационном исследовании автор определяет механизм как последовательность мероприятий и состояний, формирующих определенный процесс и обладающих обратной связью. [111]. Таблица 2.9 содержит требования к экономическому механизму.

Таблица 2.9 – Требования к механизмам

Требование	Расшифровка
Дискретность	Механизм состоит из конечного числа последовательных этапов.
Определенность	Каждый этап не допускает двусмысленности и разнотений.
Результативность	Цель – получение конкретного результата из заданных исходных данных.
Конечность	Решение задачи достигается за конечное число этапов.

*Источник: составлено автором по данным [136]*

Основу экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий (на примере двигателестроения) составляют разработанные, в соответствии с задачами исследования, методический подход и инструментарий. Предложенный в диссертации экономический механизм имеет блочную структуру. Блок анализа возможностей разработки и реализации КС технологий, требований к характеристикам ВТП, включает оценку характеристик ВТП двигателестроения, анализ существующих технологий, используемых конкурентами в двигателестроении, анализ требований заказчиков,

по улучшению характеристик ВТП двигателестроения, анализ экономических показателей предприятий производителей ВТП.

Блок оценки полезности разработки, реализации КС технологии для ВТП, предприятий производителей с учётом рисков включает этап оценки полезности разработки КС технологии с учётом рисков для науки и техники: проводится оценка компонент полезности разработанной КС технологии двигателестроения и факторов риска, определяется показатель полезности разработки КС технологии для науки и техники с учётом риска и оценивается в соответствии с разработанной шкалой и этап оценки полезности разработанной КС технологии для характеристик ВТП на основе анализа параметров полезности и факторов рисков. Оценка полезности технологии для науки и техники осуществляется на основе анализа параметров полезности: КПД, изменения системы охлаждения, повышения экономичности двигателя, увеличение тяги, улучшение подачи кислорода в прямоточный контур на больших высотах полета летательного аппарата, также факторов риска (температура, посадочная дистанция, вибрация и бафтиг, шум) проведена . Оценка полезности технологии для ВТП осуществляется на основе анализа параметров полезности: масса, скорость, высота, манёвренность, лётные характеристики, надёжность, также факторов риска ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП, лётных характеристик.

В разработанный в диссертации экономический механизм комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении входит блок оценки полезности внедрения КС технологии для улучшения технологической независимости государства с учётом рисков. Оценка реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении включает оценку полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков. Определяется показатель полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков, оценка производится в соответствии с разработанной шкалой. Выделяется этап оценки полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков. Определяется

показатель изменения технологической независимости от внедрения КС технологии с учётом рисков, экономических факторов, который оценивается в соответствии с разработанной шкалой. В итоге формализована комплексная оценка разработки и реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении. Оценка полезности технологии для предприятия осуществляется на основе анализа параметров полезности: выполнение требований заказчиков к ВТП, спрос на ВТП с использованием новой технологии, финансово-экономические показатели предприятия, а также факторов риска: сложность, время, финансовая возможность изменения производственной, материально-технической, кадровой базы.

Оценка полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности) осуществляется на основе анализа параметров: спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях, развитие ИИ, увеличение занятости, налогов, создание новых направлений труда, снижение технологической зависимости, укрепление технологического суверенитета, обеспечение ускорения темпов прироста инвестиций в основной капитал, стимулирование использования внутренних источников инвестиций, а также факторов риска: финансовый риск (субсидии), риск низкой стратегической значимости (отсутствие потенциала), недополучения промышленного эффекта от реализации технологии, риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии, риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости.

Блок управления системой разработки и реализации КС технологий включает создание и развитие единой цифровой информационно-аналитической платформы - акселератора технологий (цифровых аналогов), управлеченческих решений в направлении обоснования реализации разработанной технологии, лётных испытаний и эксплуатации, обоснования финансирования производства ВТП с использованием КС технологий, формирование сервисов и сопровождающих услуг.

Разработанные процедуры оценки полезности технологии для науки и техники, для характеристик ВТП с учётом рисков, для предприятия производителя, а также подход к оценке изменения технологической независимости государства от внедрения технологии с учётом рисков и экономических факторов на основе анализа факторов риска в цифровом пространстве принятия решений позволяют обосновать возможность выполнения контрактов на производство АТ с необходимыми характеристиками. Механизм отличается возможностью повышения скорости реакции на изменяющиеся требования к продукции в тактическом и стратегическом направлении. Следствием работы механизма является система управленческих решений по разработке и реализации критических и сквозных технологий в разрезе: пилотируемые комплексы, двигатели, двигательные и энергетические установки, в т.ч. составные части, конструкция, прочность и материаловедение, связанных с обоснованием разработки и целесообразностью реализации КС технологии, с обоснованием финансирования производства ВТП с использованием КС технологий, развития сервисов, сопровождающих услуг, с обоснованием интеграции новых материалов и технологий. Разработанный экономический механизм комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий представлен на рисунке 2.17 Эффект предложенного экономического механизма состоит выполнении требований нормативных документов по разработке методик определения показателя уровня технологического суверенитета по видам продукции, уровня технологической независимости, а также в уточнении существующих методов оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий показателями полезности разработки КС технологии для науки и техники, полезности для ВТП, предприятий изготовителей с учётом рисков, полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, показателем улучшения технологической независимости государства с учётом рисков, а также показателем комплексной оценки разработки и реализации КС технологий.

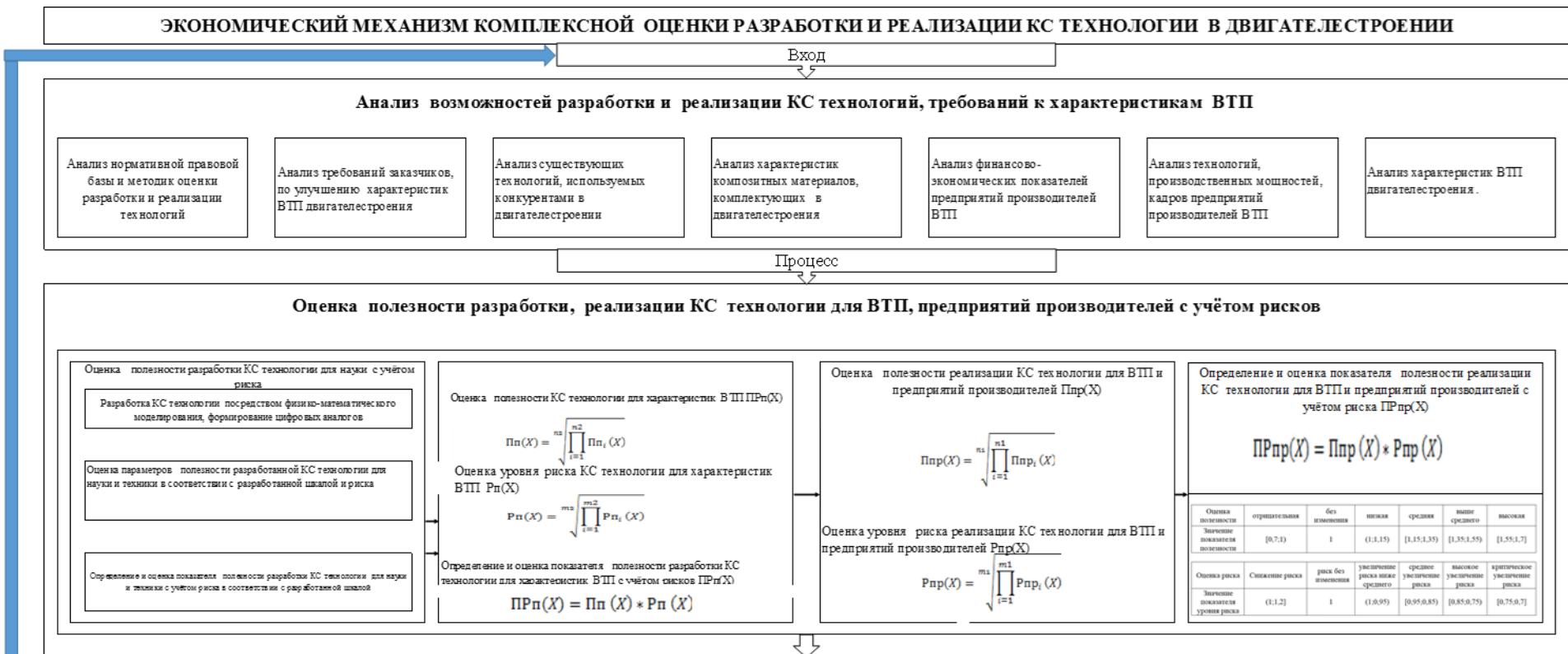
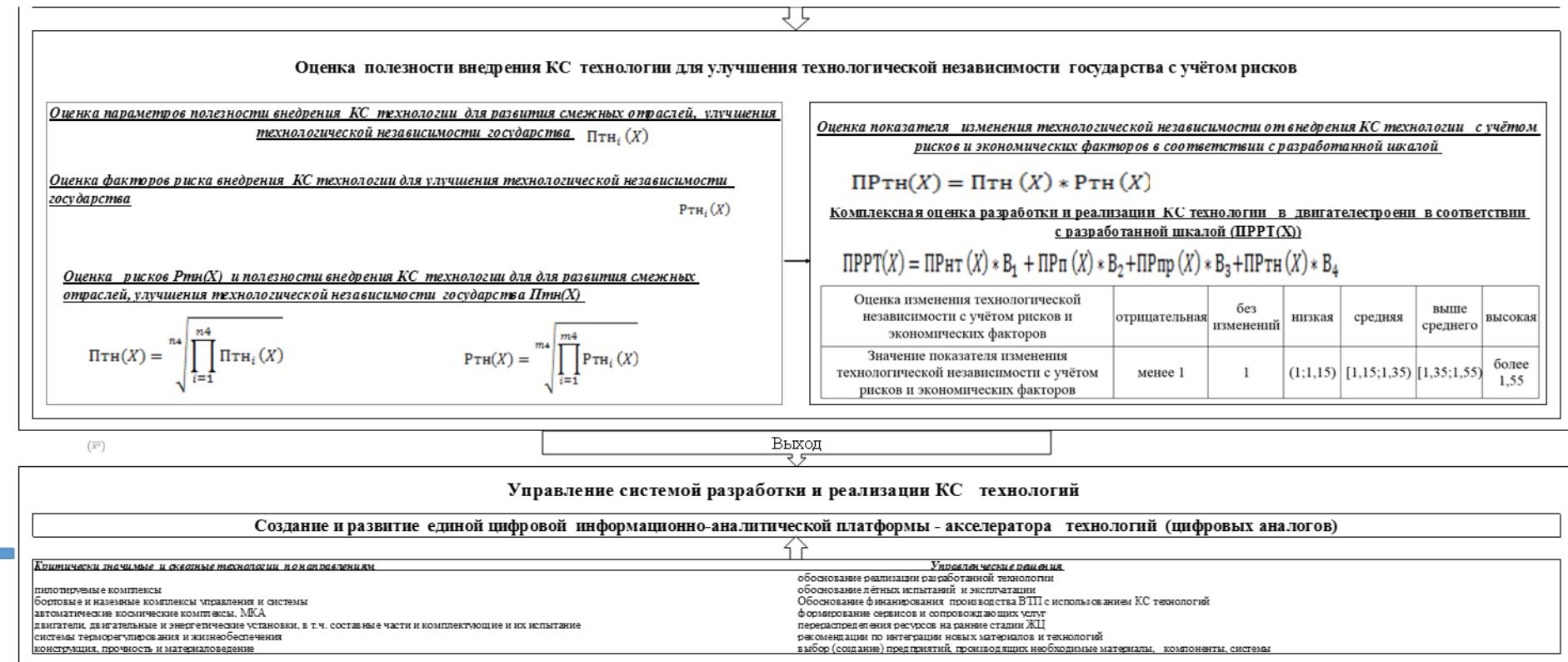


Рисунок 2.17 – Структура экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении



Источник: составлено автором

Рисунок 2.17 – Структура экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении (Продолжение)

## Выводы по 2 главе

Актуальной задачей является оценка полезности разработки технологии для науки и ВТП авиастроения, двигателестроения, в которой технология применяется. Изучена концепция «Виртуального стенда», позволяющая удовлетворить требования газодинамической эффективности, прочности, массы, ресурса, как правило, на различных режимах работы посредством цифрового моделирования. Данная концепция позволяет выполнять проектирование и доводку узлов авиационного двигателя с использованием многодисциплинарных моделей различного уровня, созданных с помощью программных комплексов NumecaFineTurbo, Concept NREC и ANSYSMechanical, а также технологии многокритериальной оптимизации IOSO. Определена проблема многодисциплинарной оптимизации узлов авиационного двигателя, изучена технология её решения в цифровом пространстве виртуального стенда, в частности, технология формирования геометрических моделей лопаток компрессора авиационного двигателя, дающая, наряду с техническими, экономические эффекты. Выделены экономические эффекты от создания критических и сквозных технологий для науки, продукции, предприятий изготовителей, независимости государства. Обоснована целесообразность оценки полезности и рисков КСТ. Определены параметры полезности и рисков КС технологии в двигателестроении для науки и техники, продукции, предприятий изготовителей, технологической независимости государства.

В диссертации проведён анализ методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции, однако в них не учитываются параметры полезности и рисков КС технологий. Предложенный методический подход оценки полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении включает аналитический этап (анализ характеристик ВТП, нормативной правовой базы, требований по улучшению характеристик двигателей, формирование баз данных по технологиям, оборудованию,

композитным материалам). На втором этапе осуществляется разработка КС технологии посредством физико-математического моделирования, формирование цифровых аналогов, цифровое моделирование использования композитных материалов, комплектующих, формирование пространства цифровых аналогов двигателя, оценка влияния изменения материалов, конструкции ЦД на характеристики двигателя. На этапе оценки полезности разработки КС технологии с учётом рисков для науки и техники проводится оценка компонент полезности разработанной КС технологии двигателестроения и факторов риска, определяется показатель полезности разработки КС технологии для науки и техники с учётом риска и оценивается в соответствии с разработанной шкалой. На последнем этапе методического подхода оценивается полезность разработанной КС технологии для характеристик ВТП на основе анализа параметров полезности и факторов рисков.

Обоснованный в диссертации методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении включает оценку полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков, определяется показатель полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков, оценка производится в соответствии с разработанной шкалой. Выделяется этап оценки полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков. Определяется показатель изменения технологической независимости от внедрения КС технологии с учётом рисков, экономических факторов, который оценивается в соответствии с разработанной шкалой. В итоге formalизована комплексная оценка разработки и реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении.

Разработанные в соответствии с задачами исследования методический подход и инструментарий составляют базис экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий двигателестроения в цифровом пространстве принятия решений на

основе анализа факторов риска. Следствием работы механизма является система управленческих решений по разработке и реализации критических и сквозных технологий в разрезе: pilotируемые комплексы, двигатели, двигательные и энергетические установки, в т.ч. составные части, конструкция, прочность и материаловедение, связанных с обоснованием разработки и целесообразностью реализации КС технологии, с обоснованием финансирования производства ВТП с использованием КС технологий, развития сервисов, сопровождающих услуг, с обоснованием интеграции новых материалов и технологий.

## **ГЛАВА 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ КРИТИЧЕСКИХ И СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ**

### **3.1 Практическая реализация методического подхода к оценке полезности разработки КС технологий в двигателестроении**

В диссертации проведена практическая реализация методического подхода к оценке полезности разработки КСТ на примере технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины. Проведён анализ нормативной правовой базы и методик оценки разработки и реализации КС технологий, анализ требований по улучшению характеристик авиационного двигателя (КПД, расход воздуха, тяга, относительный расход топлива, мощность и др.) Проведено изучение разработанной технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины. Проведен анализ пространства цифровых аналогов двигателя. Целью задачи оптимизации являлось повышение КПД. При оптимизации выполнялось варьирование геометрией рабочих лопаток и лопаток спрямляющего аппарата. Варьирование геометрии лопаточных венцов ЦБК выполнялось с помощью методов и алгоритмов параметризации лопаток ЦБК, описанных в главе 2.

#### **Результаты решения задачи многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя.**

Задача оптимизации компрессора вертолетного двигателя решалась в два этапа. Целью решения задачи оптимизации компрессора на первом этапе был поиск геометрии лопаток рабочего колеса, обеспечивающей максимальное значение КПД (газодинамическая оптимизация). Целью задачи оптимизации ЦБК было обеспечение прочностных параметров рабочего колеса компрессора (прочностная оптимизация).

В таблице 3.1 приведены результаты расчёта газодинамических параметров базового варианта компрессора вертолетного двигателя. Базовый вариант

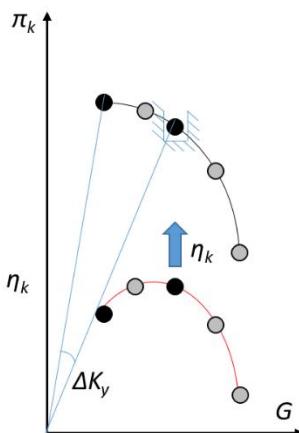
компрессора имеет достаточный запас газодинамической устойчивости  $\Delta Ky=32,17\%$ . В процессе оптимизации этот коэффициент не должен опуститься менее 15 %. Также параметры, определяющие облик компрессора при работе в составе двигателя (расход воздуха  $G$ , кг/с, степень повышения давления  $\pi_k^*$ , угол потока выхода из диффузора  $\alpha_{вых}$ , град) не должны измениться значительно.

Таблица 3.1 – Газодинамические параметры базового варианта ЦБК

Газодинамические параметры				
$G$ , кг/с	$\pi_k^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta Ky$
2,656	3,210	-14,767	78,815	32,170

*Источник: составлено автором*

На основе вышеуказанных требований была сформирована схема постановки задачи оптимизации компрессора вертолетного двигателя (рисунок 3.1)



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.1 – Схема постановки задачи компрессора авиационного двигателя

В соответствии со схемой, в процессе оптимизации контролировались положения рабочей точки (средняя точка, выделенная сплошным черным цветом на рисунке 3.1) и срывной точки (крайняя черная точка, выделенная черным цветом на рисунке 3.1). Для рабочей точки контролировались величина КПД, степень повышения давления  $\pi_k^*$ , угол выхода потока из диффузора  $\alpha_{вых}$ , град, расход воздуха  $G$ , кг/с. Для срывной точки контролировались величина расход воздуха  $G$ , кг/с, и степень повышения давления  $\pi_k^*$ . Контроль параметров в срывной точке был необходим для определения коэффициента запаса газодинамической устойчивости

$\Delta Ky$ . Для обеспечения сходимости численного решения также рассчитывались три промежуточные точки характеристики компрессора вертолетного двигателя (отмечены серым на рисунке 3.1).

Оптимизация осуществлялась за счёт изменения формы лопаток рабочего колеса. Геометрия лопаток рабочего колеса менялась за счёт смещения в окружном направлении четырех точек средней линии профиля во втулочном, среднем и периферийном сечениях. Геометрия сплитера строилась автоматически. Геометрия лопаток диффузора оставалась неизменной. Геометрия лопаток спрямляющего аппарата менялась за счёт смещения в окружном направлении трех точек средней линии профиля в одном сечении. Второе сечение спрямляющего аппарата менялось аналогично первому. Смещение точек средней линии осуществлялось за счёт изменения их углового положения  $\Theta$ . (Приложение Б).

В результате решения задачи оптимизации компрессора вертолетного двигателя был получен варианта компрессора, имеющий более высокий КПД.

В таблице 3.2 показано сравнение параметров базового и оптимизированного вариантов компрессора. Как видно из таблицы 3.2, оптимизированный вариант компрессора вертолетного двигателя обеспечивает повышение КПД на 0,734 %, при увеличении расхода воздуха на 0,021 кг/с, увеличении степени повышения давления на 0,045, и уменьшении угла выхода потока на 3,884 градуса, при этом снижение запаса газодинамической устойчивости составило 5,848%.

Таблица 3.2 – Газодинамические параметры базового и оптимизированного варианта компрессора

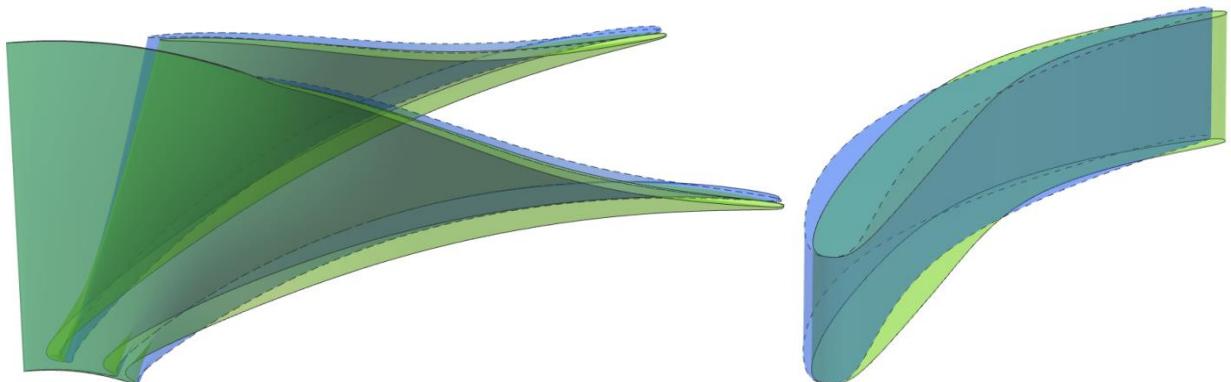
Газодинамические параметры					
	G, кг/с	$\pi_k^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta Ky$
Баз. вар. ЦБК	2,656	3,210	-14,767	78,815	32,170
Опт. вар. ЦБК	2,677	3,255	-10,883	79,549	26,322

Источник: составлено автором

Для базового и оптимизированных вариантов компрессора было осуществлено сравнение геометрии и полей распределение числе Maxa.

На рисунке 3.2 показано сравнение геометрии базового и оптимизированных вариантов компрессора вертолетного двигателя. Пунктирными линиями выделена

геометрия базовых лопаток компрессора вертолетного двигателя. Сплошными линиями выдела геометрия оптимизированных лопаток компрессора вертолетного двигателя.



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.2 – Сравнение геометрии лопаток базового и оптимизированного вариантов лопаток ЦБК (положение лопаток для наглядности произвольное)

Изучение технологии многокритериальной многодисциплинарной оптимизации турбины газогенератора. Цель решения задачи оптимизации турбины газогенератора вертолетного двигателя был поиск варианта геометрии лопаток СА и РК, обеспечивающий генерацию требуемой мощности на валу с максимальным значением КПД и максимально близким к осевому направлению выхода потока из турбины. Также должны быть обеспечены прочностные параметры: запасы по частотной отстройке (относительное расстояние между собственной частотой и опасной гармоникой)  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  не менее 30%; максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_{maxEqv}$  не более 300 МПа. В таблице 3.3. приведены результаты расчёта базового варианта турбины газогенератора.

Таблица 3.3 – Газодинамические и прочностные параметры базового варианта турбины газогенератора

Газодинамические параметры				Прочностные параметры				
G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{blade}$	$\sigma_{maxEqv}$
23.474	1.587	-23.053	95.561	39.399	31.830	19.703	22992.100	307.100

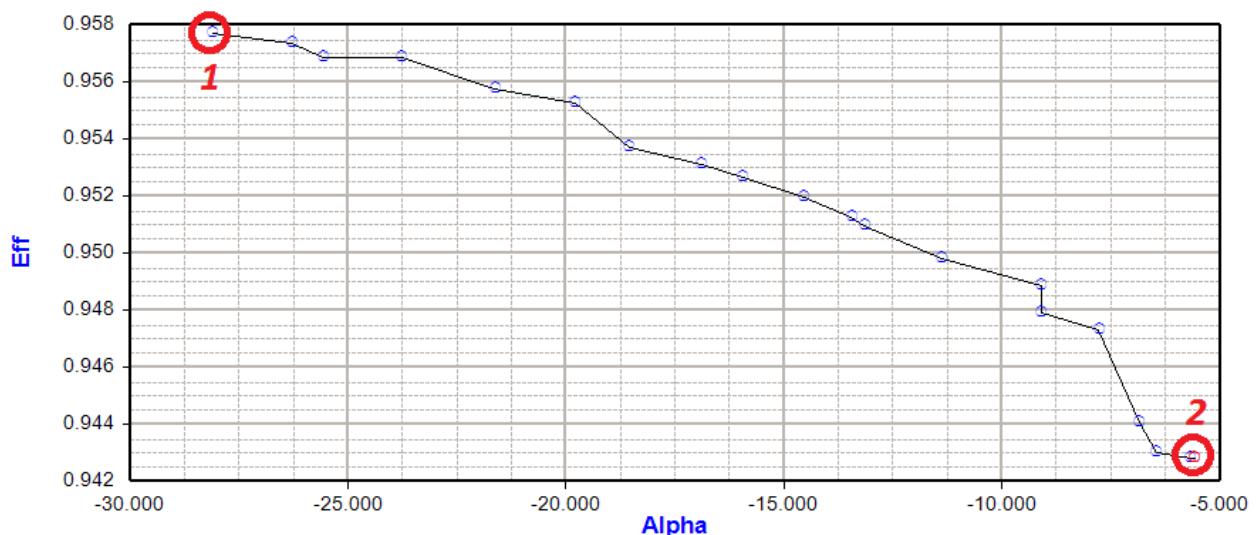
*Источник: составлено автором*

Как видно из таблицы 3.3, необходимо провести не только оптимизацию рабочего процесса с целью увеличения КПД, но и частотную отстройку по третьей собственной частоте.

Критериями оптимизации турбины газогенератора являлись:

1. Увеличение значение КПД;
2. Повышение запаса по третьей собственной частоте  $\Delta 3\%$ .

В результате решения задачи оптимизации турбины получен фронт Парето между повышением значения КПД и повышением коэффициента запаса по третьей собственной частоте  $\Delta 3$  (рисунок 3.3).



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.3 – Фронт Парето, полученный в результате решения задачи оптимизации турбины газогенератора

В таблице 3.4 показано сравнение параметров базового варианта турбины газогенератора и варианта, удовлетворяющего требованиям прочности с максимальным КПД (отмечен на рисунке 3.3).

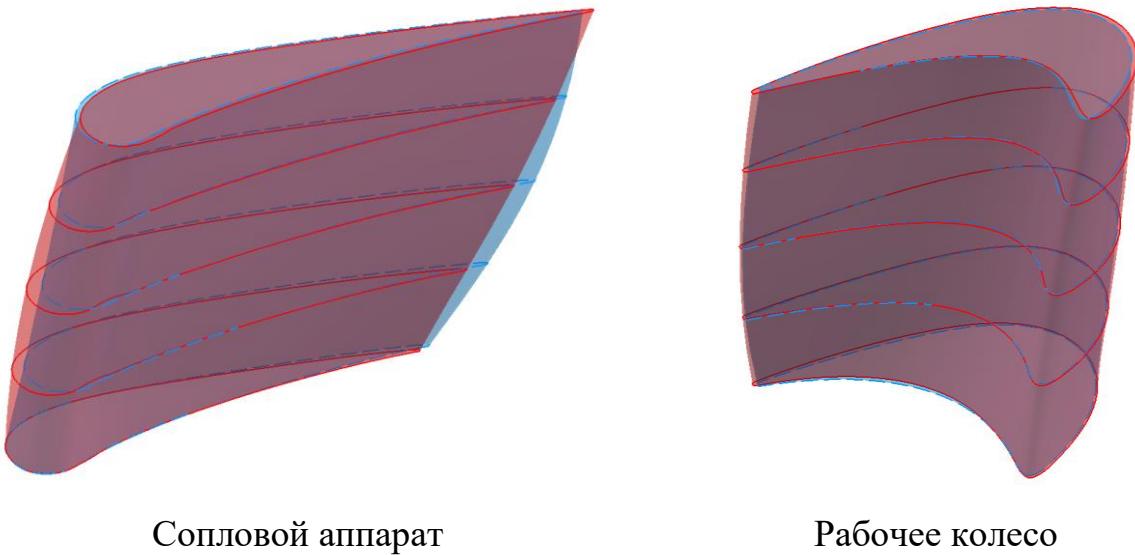
Таблица 3.4 – Сравнение газодинамических и прочностных параметров базового варианта турбины газогенератора и оптимизированного

Газодинамические параметры					Прочностные параметры				
	G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{blade}$ , Н	$\sigma_{maxEqv}$ , МПа
Баз. вар.	15.893	2.221	-25.659	89.871	48.005	31.511	19.893	21824	116
Опт. вар.	16.177	2.214	-28.003	90.017	41.213	48.838	37.167	22596	116

Как видно из таблицы 3.4, оптимизированный вариант турбины газогенератора обеспечивает повышение КПД на 0.146 % при увеличении абсолютного значения угла выхода потока из турбины 2.344 градуса.

Для базового варианта турбины газогенератора и оптимизированного было выполнено сравнение геометрии и полей газодинамических параметров были выбраны.

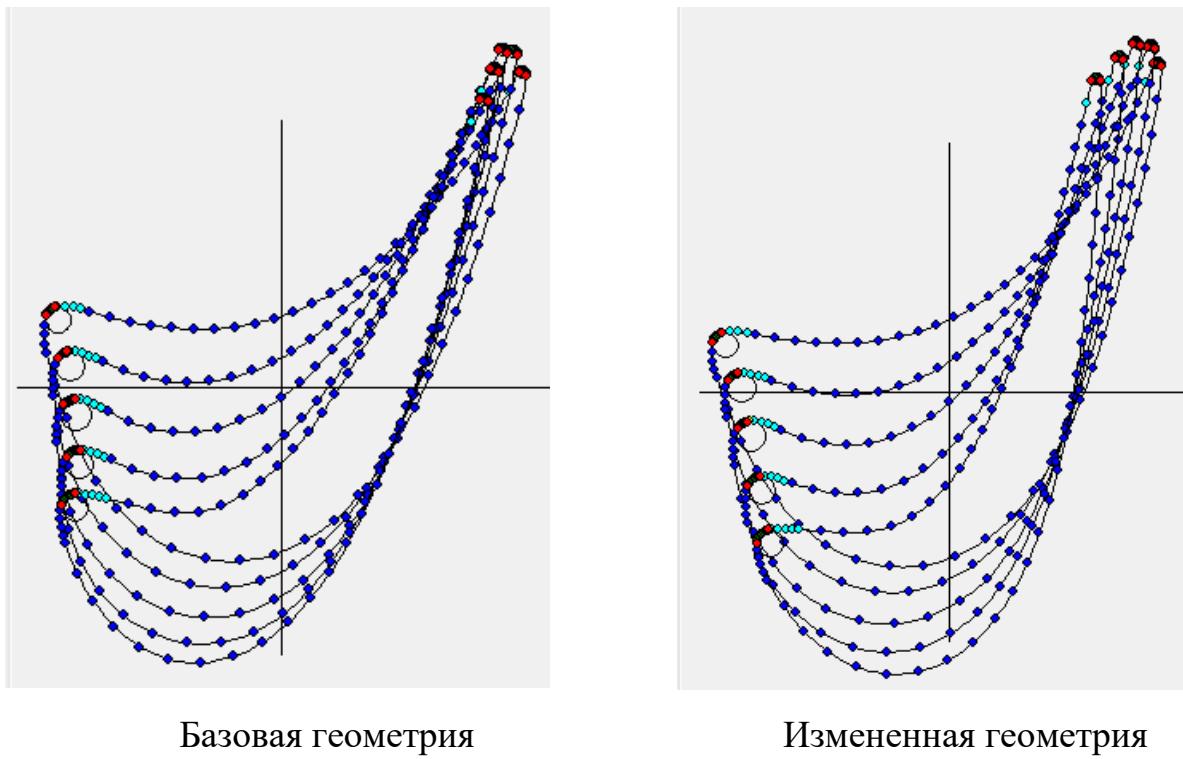
На рисунке 3.4 показано сравнение геометрии базового и оптимизированных вариантов турбины газогенератора. Пунктирными линиями выделена геометрия базовых лопаток турбины. Сплошными линиями выделена геометрия оптимизированных лопаток турбины.



*Источник: составлено автором*

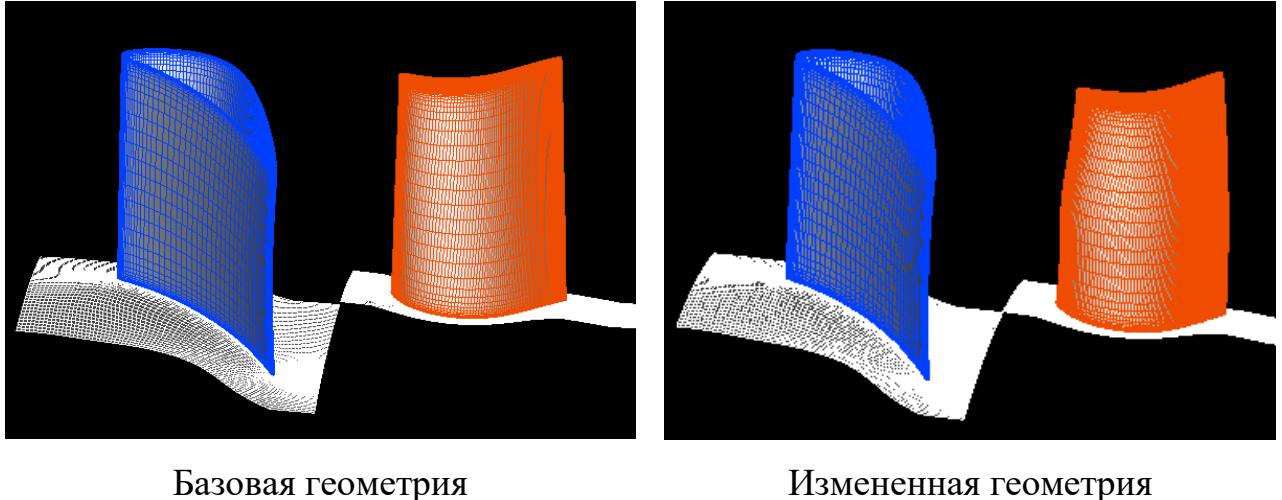
Рисунок 3.4 – Сравнение геометрии лопаток базового и оптимизированного вариантов лопаток турбины газогенератора (положение лопаток для наглядности произвольное)

Сравнение геометрии рабочего колеса в программном комплексе *Profiler*, и *Autogrid5* представлен на рисунках 3.5, 3.6.



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.5 – Сравнение геометрии рабочего колеса в программном комплексе  
*Profiler*



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.6 – Сравнение геометрии рабочего колеса в программном комплексе  
*Autogrid5*

**Изучение технологии оптимизации свободной турбины.** Цель решения задачи оптимизации СТ был поиск варианта геометрии лопаток СА и РК, обеспечивающий генерацию требуемой мощности на валу с максимальным значением КПД и максимально близким к осевому направлению выхода потока из

турбины. Также должны быть обеспечены прочностные параметры: запасы по частотной отстройке (относительное расстояние между собственной частотой и опасной гармоникой)  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  не менее 30%; максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_{maxEqv}$  не более 300 МПа.

Как видно из таблицы выше, базовый вариант СТ не удовлетворяет прочностным требованиям. Поэтому необходимо проводить не только газодинамическую оптимизацию, но и прочностную доводку.

В таблице 3.5 приведены результаты расчёта базового варианта СТ.

Таблица 3.5 – Газодинамические и прочностные параметры базового варианта СТ

Газодинамические параметры				Прочностные параметры				
G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{blade}$	$\sigma_{maxEqv}$
23.474	1.587	-23.053	95.561	39.399	31.830	19.703	22992.100	307.100

*Источник: составлено автором*

Как видно из таблицы выше, базовый вариант СТ не удовлетворяет прочностным требованиям. Поэтому необходимо проводить не только газодинамическую оптимизацию, но и прочностную доводку.

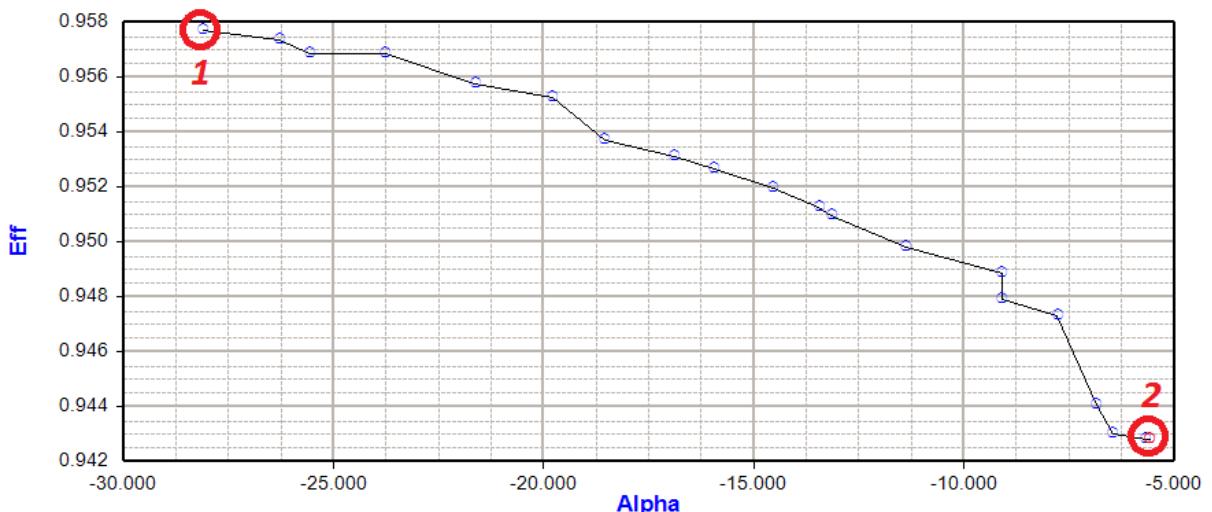
Для получения требуемого результата по оптимизации СТ, был решён ряд задач оптимизации, различающихся постановками. Различия заключались в выбранных критериях, диапазонах изменения варьируемых переменных и ограничений.

Задача решалась в три этапа. На первом этапе целью оптимизации СТ было повышение КПД и уменьшение абсолютного значения угла выхода потока из СТ. При этом прочностные ограничения были ограничены в заведомо меньших диапазонах, чем требуется. На втором этапе осуществлялась прочностная доводка СТ с целью привести прочностные параметры СТ в требуемый диапазон. На третьем этапе выполнялась газодинамическая оптимизация рабочего процесса свободной турбины по критериям КПД и выходного угла, а прочностные ограничения были заданы строго.

Критериями оптимизации СТ в постановке 1 являлись:

1. Увеличение значение КПД;
2. Минимизация угла выхода потока из турбины в абсолютном движении  $\alpha_{вых}$ .

В результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 1 получен фронт Парето между значением КПД и значением угла выхода потока из СТ в абсолютном движении (рисунок 3.7).



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.7 – Фронт Парето, полученный в результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 1

В таблице 3.6 показано сравнение параметров базового варианта СТ и варианта с максимальным значением КПД и минимальным значением абсолютного угла выхода потока из турбины (отмечены на рисунке 3.7).

Таблица 3.6 – Газодинамические и прочностные параметры базового варианта СТ и оптимизированного в постановке 1

Газодинамические параметры					Прочностные параметры				
	G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{\text{вых}}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{\text{blade}}$ , Н	$\sigma_{\text{maxEqv}}$ , МПа
Баз. вар. СТ	23.474	1.587	-23.053	95.561	39.399	31.830	19.703	22992	307
Опт. вар. СТ 1	23.148	1.566	-28.098	95.775	29.819	45.553	16.448	23234	307
Опт. Вар. СТ 2	22.901	1.607	-5.584	94.281	15.169	36.105	46.859	24013	316

*Источник: составлено автором*

Как видно из таблицы 3.6, оптимизированный вариант СТ обеспечивает повышение КПД на 0.214 % при увеличении абсолютного значения угла выхода потока из СТ 5.045 градуса, либо уменьшение угла выхода потока на 17.469 градуса

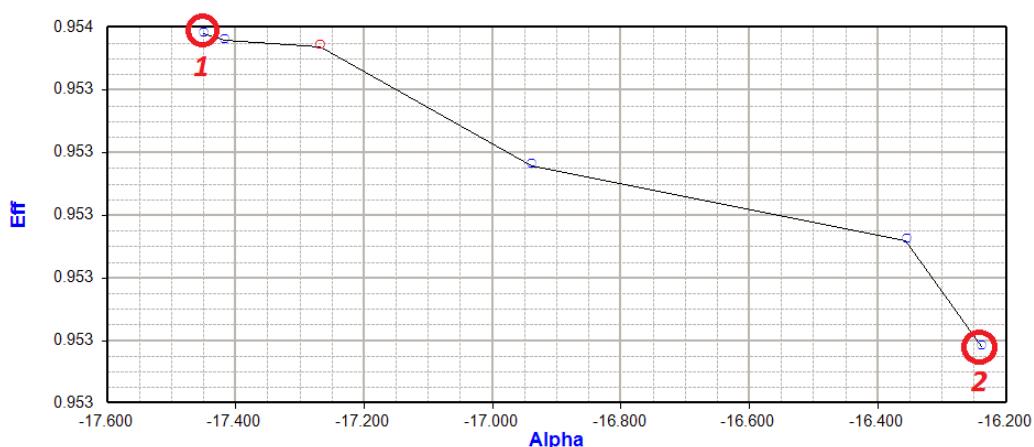
при уменьшении КПД на 1.28 %. Но прочностные ограничения при этом не выполняются.

На втором этапе оптимизации СТ решалась задача прочностной доводки. Задача в постановке 2 формировалась на основе всей истории поиска решения задачи в постановке 1.

Критериями задачи оптимизации СТ в постановке 2 являлись:

1. Увеличение значение запаса по частотной отстройке от первой гармоники;
2. Минимизация значения максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_{maxEqv}$ , МПа.

В результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 2 получено множество вариантов СТ, удовлетворяющих прочностным требованиям (Рисунок 3.8).



*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.8 – Фронт Парето, полученный в результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 2

В таблице 3.7 показано сравнение параметров базового варианта СТ и варианта с максимальным значением КПД минимальным значением абсолютного угла выхода потока из турбины (отмечены на рисунке 3.8).

Таблица 3.7 – Газодинамические и прочностные параметры базового варианта СТ и оптимизированного в постановке 2

Газодинамические параметры					Прочностные параметры				
	G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{blade}$ , Н	$\sigma_{maxEqv}$ , МПа
Баз. вар. СТ	23.47 4	1.587	-23.053	95.561	39.399	31.830	19.703	22992	307
Опт. вар. СТ 1	23.46 2	1.587	-17.450	95.349	32.769	46.280	31.637	23973	283.3
Опт. Вар. СТ 2	23.42 8	1.586	-16.356	95.316	30.448	41.794	33.581	23996	272.2

Источник: составлено автором

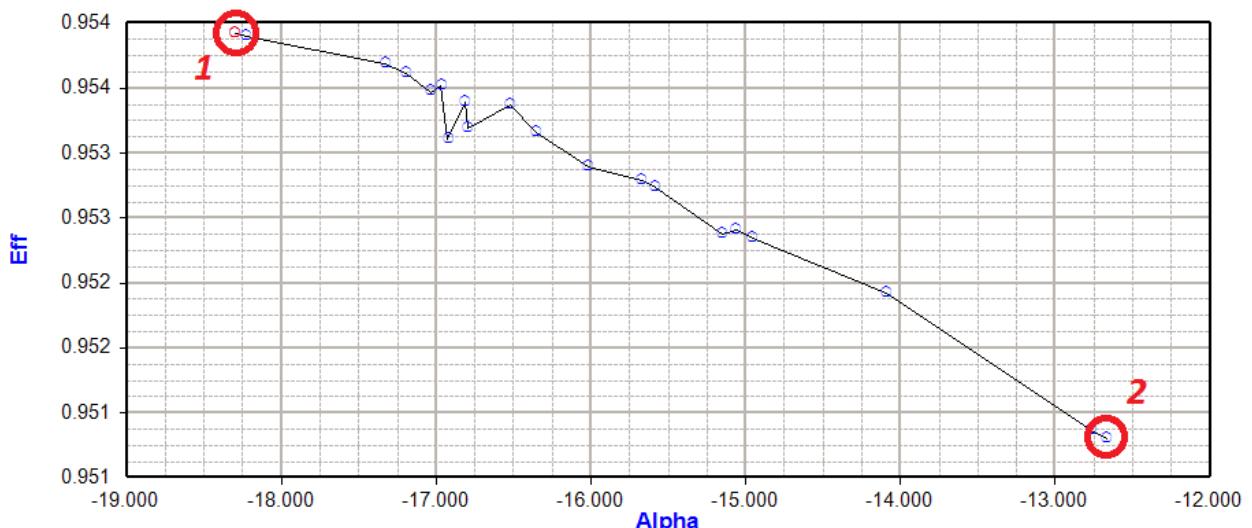
Как видно из таблицы 3.7, оптимизированный вариант СТ, удовлетворяющий прочностным требованиям, имеет меньшее значение КПД, чем базового.

Для окончательной доводки турбины была выполнена оптимизация в постановке 3. Целью данной задачи являлось повышение КПД и сокращении абсолютного значения выходного угла при строгих прочностных ограничениях.

Критериями задачи оптимизации СТ в постановке 3 являлись:

1. Увеличение значение КПД;
2. Минимизация угла выхода потока из турбины в абсолютном движении  $\alpha_{вых}$ .

В результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 3 получено множество Парето компромиссных вариантов СТ между повышением КПД и уменьшением абсолютного значения угла выхода потока из турбины, удовлетворяющих прочностным требованиям (Рисунок 3.9).



Источник: составлено автором

Рисунок 3.9 – Фронт Парето, полученный в результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 3

В таблице 3.8 показано сравнение параметров базового варианта СТ и варианта с максимальным значением КПД минимальным значением абсолютного угла выхода потока из турбины (отмечены на рисунке 3.9).

Таблица 3.8 – Газодинамические и прочностные параметры базового варианта СТ и оптимизированного в постановке 3

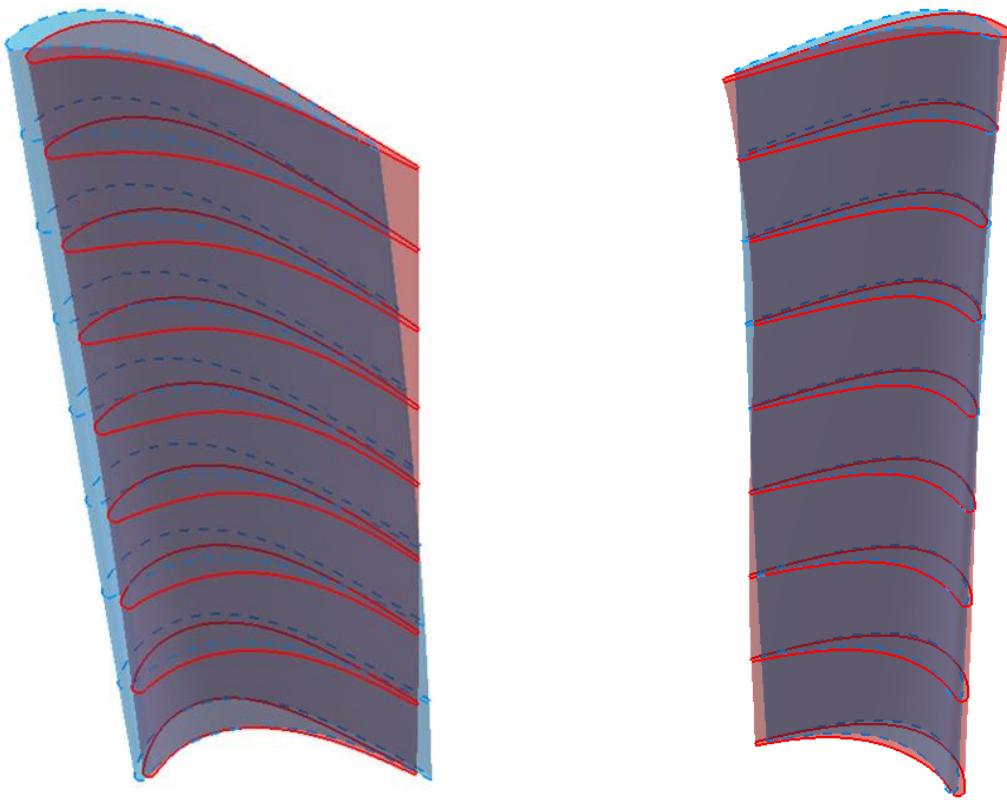
Газодинамические параметры					Прочностные параметры				
	G, кг/с	$\pi_T^*$	$\alpha_{вых}$ , град	КПД	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$f_{blade}$ , Н	$\sigma_{maxEqv}$ , МПа
Баз. вар. СТ	23.474	1.587	-23.053	95.561	39.399	31.830	19.703	22992	307
Опт. вар. СТ 1	23.589	1.586	-18.301	95.392	33.963	41.259	40.958	23935	291
Опт. Вар. СТ 2	23.469	1.594	-12.668	95.080	30.038	42.037	48.485	23956	296

*Источник: составлено автором*

Как видно из таблицы 3.8, в результате оптимизации был получен вариант СТ, обеспечивающий уменьшение модуля значения угла выхода потока из турбины в абсолютном движении  $\alpha_{вых}$  на 4.752 при уменьшении значения КПД на 0,169 %, либо уменьшение модуля значения угла выхода потока из турбины в абсолютном движении  $\alpha_{вых}$  на 10.385 при уменьшении значения КПД на 0,481 %. Следует отметить, что данный проект оптимизация СТ являлся демонстрационным. В реальном проекте можно получить значительно большие улучшения параметров работы СТ.

Для базового варианта СТ и варианта СТ с максимальным значением КПД полученного в результате решения задачи оптимизации СТ в постановке 3 (точка 1 на рисунке 3.8) было осуществлено сравнение геометрии и полей газодинамических параметров были выбраны.

На рисунке 3.10 показано сравнение геометрии базового и оптимизированных вариантов СТ. Пунктирными линиями выделена геометрия базовых лопаток СТ. Сплошными линиями выделена геометрия оптимизированных лопаток СТ.



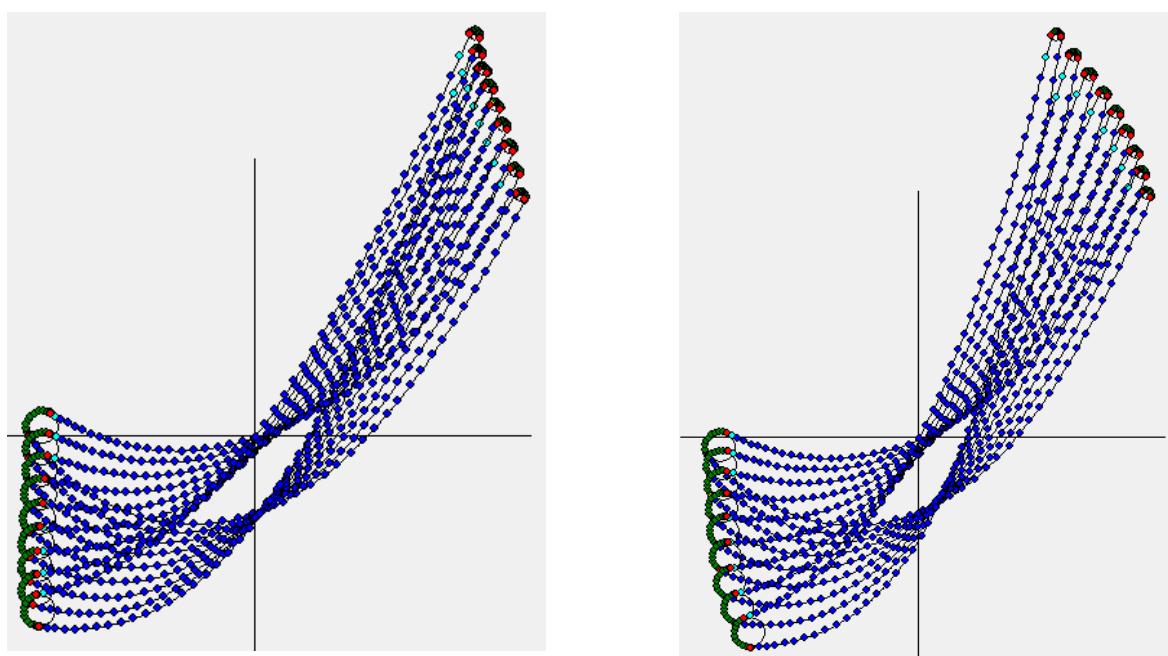
Сопловой аппарат

Рабочее колесо

*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.10 – Сравнение геометрии лопаток базового и оптимизированного вариантов лопаток СТ (положение лопаток для наглядности произвольное)

Сравнение базовой и измененной геометрии показано на рисунках 3.11 и 3.12.

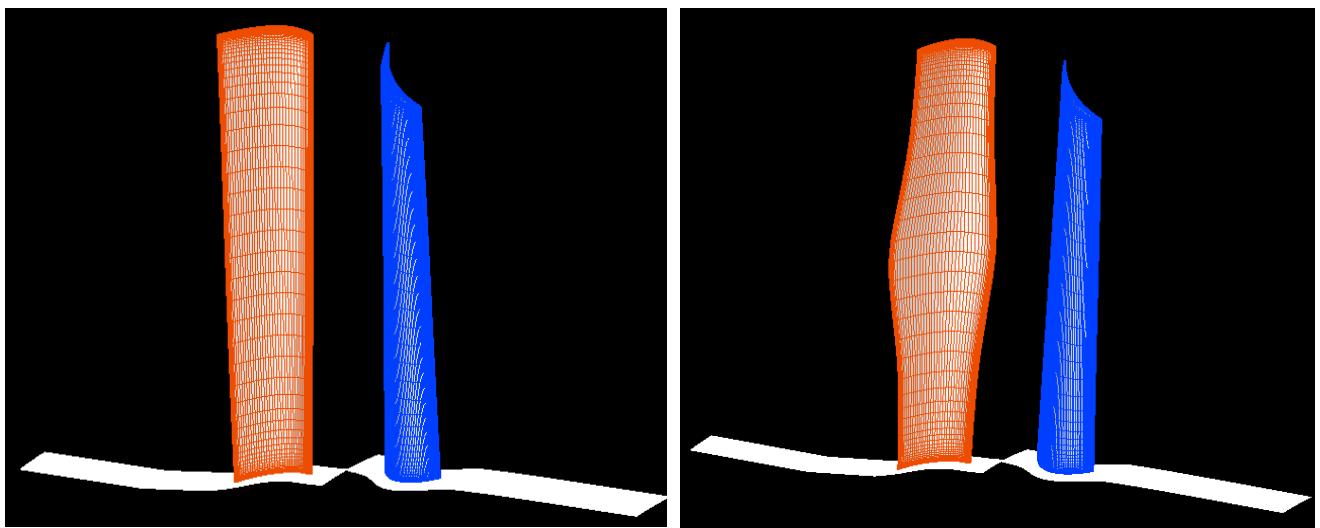


## Базовая геометрия

## Измененная геометрия

*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.11 – Сравнение геометрии рабочего колеса в программном комплексе  
*Profiler*



## Базовая геометрия

## Измененная геометрия

*Источник: составлено автором*

Рисунок 3.12 – Сравнение геометрии рабочего колеса в программном комплексе  
*Autogrid5*

Таким образом, изучена технология многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины, позволяющая улучшить КПД двигателя. Определены параметры полезности технологии и возможные риски.

На следующем этапе методического инструментария оценки полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении проводилась оценка полезности разработки технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины с учётом рисков для науки и техники. Оценивались компоненты полезности разработанной технологии  $\Pi_{\text{нт}_i}(X)$ , факторы риска методом экспертных оценок. Проводилось согласование мнений экспертов и формировалась итоговая оценка. Формировался показатель полезности разработанной технологии

для науки и техники Пнт(Х) по предложенной в параграфе 2.1 модели. Определялся уровень риска технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для науки и техники Рнт(Х) (таблица 3.9). В соответствии с разработанной шкалой дана оценка полезности технологии для науки и техники и оценка уровня риска. Определён показатель полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины ПРнт(Х) для науки и техники с учётом риска, дана его оценка в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.10, 3.11).

Таблица 3.9 – Параметры полезности технологии для науки и техники

Параметры полезности технологии для науки и техники	Оценка полезности	Факторы риска технологии	Оценка риска
КПД	1,2	Температура	1
Изменение системы охлаждения	1,1	Посадочная дистанция	1
Повышение устойчивости переключения степени двухконтурности на разных режимах полета	1,2	Траектория взлёта	1
Повышение экономичности двигателя	1,2	Набор высоты	1
Увеличение тяги двигателя при минимальном расходе топлива с ростом высоты	1,1	Вибрация и бафтиг	1
Улучшение подачи кислорода в прямоточный контур на больших высотах полета летательного аппарата	1,2	Шум	1
Оглашение работы секций компрессоров и турбины за счет регулирования реактивного сопла и изменения площади проходного сечения смесительной камеры	1,2	Нагрузки	1
Изменение количества воздуха, проходящего через второй контур двигателя, .возможность использовать части воздуха из него для охлаждения горячей части двигателя (при максимальных нагрузках двигателя)	1,1	Прочность и деформация .	1
Применение укороченной высокотемпературной КС, подобной камерам сгорания, используемым в ракетных двигателях космической техники, которая позволяет увеличить количество сжигаемого топлива, и, соответственно, повысить тягу до уровней, которые в настоящее время требуют перехода на форсажные режимы работы силовой установки	1,2	Расчетные веса и положения центра тяжести и др.	1
Возможность увеличения количества сжигаемого топлива, и, соответственно, повышения тяги до уровней, которые требуют перехода на форсажные режимы работы силовой установки	1,2		
Возможность СУ обеспечивать устойчивое переключение степени двухконтурности на разных режимах полета. За счет возможности переключения двигателя между режимами и будет достигаться топливная эффективность	1,1		
Снижение потребления топлива (при полете на крейсерской дозвуковой скорости «третий воздушный контур» может быть открыт)	1,2		

Улучшение топливной эффективности (например, за счет создание адаптивного трехконтурного двигателя)	1,2		
Снижение удельного расхода топлива при длительном крейсерском полете с дозвуковой скоростью и барражировании	1,1		
Повышение уровня удельной тяги на разнообразных боевых режимах, включая короткий взлет и посадку, сверхзвуковой полет, боевое маневрирование, перехват и др	1,2		
Улучшение согласования работы секций компрессоров и турбины (например, за счет регулирования реактивного сопла и изменения площади проходного сечения смесительной камеры при увеличении скорости полета летательного аппарата выше сверхзвуковой при последовательном отключении ступеней компрессора, начиная с секции дополнительного компрессора низкого давления до последней ступени основного компрессора, и включение прямоточного контура)	1,2		

Таблица 3.9 – Параметры полезности технологии для науки и техники  
(продолжение)

Параметры полезности технологии для науки и техники	Оценка полезности	Факторы риска технологии	Оценка риска
Изменение тяги для совершения крейсерского полета в широком диапазоне скоростей и высот полета	1,3		
Снижение удельного расхода топлива при дозвуковых скоростях полета (путем изменения степени повышения давления в вентиляторе и расхода воздуха в газогенераторе при сохранении величины температуры газа перед турбиной)	1,2		
Оптимизация теплового регулирования интегрированной системы охлаждения силовой установки и самолета, снижение уровня заметности	1,2		
Отборы воздуха на улучшение аэродинамических характеристик самолета, для поддержания постоянного расхода воздуха на входе в двигатель при его дросселировании (для повышения степень двухконтурности и тем самым экономичности двигателя)	1,1		
Снижение лобового сопротивления воздухозаборника по жидкой линии	1,2		
Повышение уровня удельной тяги на разнообразных боевых режимах, включая короткий взлет и посадку, сверхзвуковой полет, боевое маневрирование, перехват и др.,	1,1		
Согласование входного устройства, двигателя и выходного устройства в составе силовой установки многоцелевого сверхзвукового самолета	1,2		
<b>Оценка полезности технологии для науки и техники Пннт(Х)</b>	1,1727	<b>Оценка риска технологии для науки и техники Рннт(Х)</b>	1,0000
<b>Оценка полезности технологии для науки и техники ПРннт(Х) с учётом рисков</b>			1,1727

Источник: составлено автором

Таким образом, оценка и полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и

свободной турбины для науки и техники с учётом рисков относится к категории – средняя.

Шкалы оценки полезности и риска технологии для науки и техники приведены в таблице 3.10 и 3.11.

Таблица 3.10 – Шкала оценки полезности технологии

Оценка полезности	отрицательная	без изменения	низкая	средняя	выше среднего	высокая
Значение показателя полезности	[0,7;1)	1	(1;1,15)	[1,15;1,35)	[1,35;1,55)	[1,55;1,7]

*Источник: составлено автором*

Таблица 3.11 – Шкала оценки риска технологии

Оценка риска	Снижение риска	риск без изменения	увеличение риска ниже среднего	среднее увеличение риска	высокое увеличение риска	критическое увеличение риска
Значение показателя уровня риска	(1;1,2]	1	(1;0,95)	[0,95;0,85)	[0,85;0,75)	[0,75;0,7]

*Источник: составлено автором*

На следующем этапе проводится оценка полезности разработанной технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для характеристик вертолёта с учётом рисков, включающая оценку параметров полезности технологии для характеристик вертолёта  $\Pi_i(X)$ , оценку факторов риска при использовании технологии  $R\Pi_i(X)$ , определение показателя полезности технологии  $\Pi(X)$  и уровня риска  $R\Pi(X)$  для характеристик вертолёта (таблица 3.12).

Затем осуществляется оценка полезности и риска технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя для характеристик вертолёта в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.10), а также определение и оценка показателя полезности разработки технологии для характеристик вертолёта с учётом рисков ( $\Pi R\Pi(X)$ ) в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.11).

Таблица 3.12 – Шкала оценки риска технологии для науки и техники

<b>Параметры полезности технологии для ВТП</b>	<b>Оценка полезности</b>	<b>Факторы риска при реализации технологии в ВТП</b>	<b>Оценка риска</b>
Масса	1,2		
Скорость	1,1	Риск ухудшения летных характеристик	1
Высота	1,2	Риск ухудшения надёжности	1
Манёвренность	1,2	Риск ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП	1
Летные характеристики	1,2	Риск ухудшения общих характеристик	1
Надёжность	1,1		
Характеристики систем, обеспечивающих управление ВТП	1,2		
Общие характеристики	1,25		
<b>Оценка полезности технологии для характеристик ВТП Пп(Х)</b>	<b><u>1,180</u></b>	<b>Оценка риска реализации технологии для характеристик ВТП Рп(Х)</b>	1,000
<b>Оценка полезности технологии для характеристик ВТП ПРп(Х) с учётом рисков</b>			<b><u>1,18019</u></b>

Анализ показывает, что оценка полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для характеристик вертолёта с учётом рисков относится к категории – средняя.

### 3.2 Практическая реализация методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении

В диссертации проведена реализация методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий на основе показателя уровня технологической независимости на примере многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины. Как было показано в предыдущем параграфе проведено изучение разработки КС технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины

посредством физико-математического моделирования, формирование цифровых аналогов, оценка полезности разработки технологии с учётом рисков для науки и техники, для характеристик вертолёта с учётом рисков.

Важным этапом разработанного инструментария является оценка полезности реализации технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для вертолёта и предприятия производителя с учётом рисков  $\text{Ппр}(X)$ , посредством оценки компонент полезности  $\text{Ппр}_i(X)$  и рисков  $\text{Рпр}_i(X)$  реализации технологии для вертолёта и предприятия производителя .

В исследовании определяется показатель полезности  $\text{Ппр}(X)$ , уровня риска  $\text{Рпр}(X)$  реализации технологии для вертолёта и предприятия производителя реализации технологии для вертолёта и предприятия производителя (таблица 3.13). Даётся оценка полезности и риска реализации технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для вертолёта и предприятия производителя в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.10, 3.11). В итоге оценивается показатель полезности реализации технологии для вертолёта и предприятия производителя с учётом риска  $\text{ПРпр}(X)$  в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.10, 3.11).

Таблица 3.13 – Параметры полезности технологии для предприятия, группы производителей

<b>Параметры полезности технологии для предприятия, группы производителей</b>		<b>Факторы риска при реализации технологии на предприятии</b>	
Требования заказчиков к ВТП, использующей технологию	1,2	сложность изменения производственной базы	0,8
Характеристики ВТП конкурентов	1,2	сложность изменения материально-технической базы	0,9
Спрос на ВТП с использованием новой технологии	1,1	сложность изменения кадровой базы	0,9
Изменение объёма реализации ВТП, использующей технологию	1,2	финансовая возможность изменения производственной базы	0,8
Финансово-экономические показатели предприятия	1	финансовая возможность изменения материально-технической базы	0,8
Устойчивость функционирования предприятия в текущем периоде (конкурентоспособность)	1	финансовая возможность изменения кадровой базы	0,9

Устойчивость функционирования предприятия в перспективном периоде (конкурентоспособность)	1,25	время изменения производственной базы	0,8
		время материально-технической базы	0,9
		время изменения кадровой базы	0,9
		риск высокой стоимости производства ВТП с использованием технологии	0,8
		риск неокупаемости производства ВТП с использованием технологии	0,9
		риск недополучения результата (не повысились объемы продаж, необходимость снижения цен)	0,9
		риск неудовлетворения требований заказчиков в перспективе (отставания от конкурентов) (низкий потенциал технологии)	0,8
		риск снижения надёжности ВТП от внедрения технологии	1
<b>Оценка полезности технологии для ВТП и предприятия производителя Ппр(Х)</b>	1,132	<b>Оценка риска технологии для ВТП и предприятия производителя Рпр(Х)</b>	0,862
<b>Оценка полезности технологии для ВТП и предприятия производителя Ппр(Х) с учётом рисков</b>			<b><u>0,97562</u></b>

Источник: составлено автором

Таким образом, оценка и **полезности технологии** многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины **для вертолёта и предприятия производителя с учётом рисков** относится к категории – отрицательная, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

На следующем этапе методического инструментария проводится оценка полезности внедрения технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков Птн(Х) посредством оценки параметров полезности и риска внедрения технологии для улучшения технологической независимости государства Птн<sub>i</sub>(X). Определяются показатели полезности и риска внедрения технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства Птн(Х), Ртн(Х), Формируется оценка показателя

изменения технологической независимости от внедрения технологии многоокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины с учётом рисков и экономических факторов ПРтн(Х) в соответствии с разработанной шкалой (таблица 3.14).

Таблица 3.14 – Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности)

<b>Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности)</b>		<b>Факторы риска в масштабах государства при реализации технологии</b>	
Спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях вследствие новой технологии	1,1	Экологический риск	1
Изменение объёма реализации на продукцию, услуги в смежных отраслях вследствие новой технологии	1,2	Финансовый риск (субсидии)	0,75
Развитие ИИ (формирование ЦД)	1,2	Риск недополучения социально-экономического эффекта от реализации технологии (налогам, занятости, привлечению инвестиций)	0,8
Увеличение занятости, создание новых направлений труда	1,1	риск узкомасштабности технологии	0,9

Таблица 3.14 – Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности) (продолжение)

Увеличение налогов	1,2	Риск низкой стратегической значимости (отсутствия потенциала)	0,9
Потенциал технологии	1,1	Риск недополучения промышленного эффекта от реализации технологии (развитию смежных производств)	0,95
Снижение технологической зависимости, укрепление технологического суверенитета	1,2	Риск недополучения технологического лидерства вследствие долгого внедрения технологии	1
Лидерство в развитии науки и технологий с целью обеспечения национальной безопасности	1,2	Риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости	1
Трансформация механизмов производства и потребления, появление новых рынков товаров и услуг, изменение облика существующих отраслей экономики и технологических стандартов, повышение уровня переработки природных ресурсов,	1,1	Риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии	1

снижение энергоемкости от внедрения технологии			
Появление и востребованность новых профессий, повышение требования к уровню образования и квалификации работников.	1,2		
Способствование созданию образцов вооружения, военной и специальной техники, систем обеспечения безопасности, обладающих ранее недостижимыми характеристиками.	1,1		
Наращивание потенциала РФ РОС в области фундаментальных и прикладных исследований	1,2		
Способствование созданию на территории РФ благоприятной деловой среды, повышение привлекательности российской юрисдикции для российских и иностранных инвесторов, деофшоризация экономики;	1,2		
Обеспечение ускорения темпов прироста инвестиций в основной капитал, доступности долгосрочного кредитования, защиты и поощрения капиталовложений, стимулирование использования внутренних источников инвестиций;	1,1		

*Источник: составлено автором*

**Таблица 3.14 – Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности) (продолжение)**

Обеспечение устойчивого развития реального сектора экономики, создание высокотехнологичных производств, новых отраслей экономики, рынков товаров и услуг на основе перспективных высоких технологий;	1,2		
Повышение производительности труда путем модернизации промышленных предприятий и инфраструктуры, цифровизации, использования технологий искусственного интеллекта, создания высокотехнологичных рабочих мест;	1,1		
Преодоление критической зависимости российской экономики от импорта технологий, оборудования и комплектующих за счет ускоренного внедрения передовых российских технологических разработок, локализации производства на территории России;	1,2		

Технологическое обновление базовых секторов экономики (промышленность, строительство, связь, энергетика, сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых), форсированное развитие российского машиностроения, в том числе приборо- и станкостроения, приоритетное использование отечественной продукции при решении задач модернизации экономики;	1,2		
Развитие радиоэлектронной промышленности, производства информационных технологий и оборудования, необходимых для решения задач в области цифровизации экономики и государственного управления;	1,1		
Модернизация производственной базы организаций оборонно-промышленного комплекса, увеличение объемов выпускаемой ими высокотехнологичной продукции гражданского и двойного назначения;	1,2		
Формирование долгосрочных спроса и предложения в отношении высокотехнологичной продукции, создаваемой для обеспечения технологического лидерства РФ ;	1		
<b>Оценка полезности внедрения технологии для технологической независимости государства Птн(Х)</b>	1,151	<b>Оценка риска внедрения технологии для технологической независимости гос-ва Ртн(Х)</b>	0,918

Таблица 3.14 – Параметры полезности технологии для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности)  
(продолжение)

Оценка изменения технологической независимости от внедрения технологии с учётом рисков и экономических факторов	1,056141
---	----------

Источник: составлено автором

Анализ показывает, что оценка изменения технологической независимости от внедрения технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины с учётом рисков и экономических факторов относится к категории – низкая, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

Итогом практической реализации предложенного в диссертации методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий является комплексная оценка разработки и реализации технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя,

турбины газогенератора и свободной турбины в соответствии с разработанной шкалой (ПРРТ(Х)) (Таблица 3.16). Значимость показателя определялась экспертным путём, проводилось согласование мнений экспертов из компаний ОКБ им. А. Люльки-филиал ПАО «ОДК-УМПО», сотрудников института «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» МАИ и формировалась итоговая оценка.

Шкала показателя изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов (таблица 3.15)

Таблица 3.15 – Шкала показателя изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов

Оценка изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов, комплексная оценка КС технологии	отрицательная	без изменений	низкая	средняя	выше среднего	высокая
Значение показателя изменения технологической независимости с учётом рисков и экономических факторов, комплексной оценки	менее 1	1	(1;1,15)	[1,15;1,35]	[1,35;1,55)	более 1,55

Таблица 3.16 – Комплексная оценка технологии

Показатель	Значение оценки	Значимость	Комплексная оценка
Оценка полезности технологии для науки и техники ПРнт(Х)	1,173	0,1	0,1173
Оценка полезности технологии для характеристик ВТП ПРп(Х) с учётом рисков	1,180	0,4	0,4721
Оценка полезности технологии для ВТП и предприятия производителя ПРпр(Х) с учётом рисков	0,976	0,3	0,2927
Оценка изменения технологической независимости от внедрения технологии с учётом рисков и экономических факторов ПРтн(Х)	1,056	0,2	0,2112
Комплексная оценка разработки и реализации КСТ (на примере двигателестроения)		1	1,0933

Анализ показывает, что комплексная оценка разработанной технологии

многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины относится к категории – низкая и не рекомендуется к внедрению.

### **Выводы по 3 главе**

В диссертации проведена практическая реализация методического подхода к оценке полезности разработки технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины) на основе анализа внутренних и внешних факторов риска и методического инструментария оценки реализации КСТ. На основе анализа параметров полезности для науки технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины: КПД, изменения системы охлаждения, повышения экономичности двигателя, увеличение тяги, улучшение подачи кислорода в прямоточный контур на больших высотах полета летательного аппарата, также факторов риска (температура, посадочная дистанция, вибрация и бафинг, шум) проведена оценка полезности технологии для науки и техники. В соответствии с разработанным методическим подходом оценка полезности технологии для науки и техники с учётом рисков составляет 1,1727 и относится к категории средняя.

Проведена оценка полезности технологии для ВТП посредством анализа параметров полезности технологии для ВТП: масса, скорость, высота, манёвренность, лётные характеристики, надёжность, также факторов риска ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП, лётных характеристик. В соответствии с разработанным методическим подходом оценка полезности технологии для ВТП с учётом рисков составляет 1,180 , относится к категории средняя. В соответствии с разработанным методическим инструментарием проведена оценка полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для предприятия на основе анализа параметров полезности: выполнение требований заказчиков к ВТП, спрос на ВТП с использованием новой

технологии, финансово-экономические показатели предприятия, а также факторов риска: сложность, время, финансовая возможность изменения производственной, материально-технической, кадровой базы. Оценка полезности технологии для ВТП. с учётом рисков составляет 0,97562 относится к категории отрицательная, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

В соответствии с разработанным методическим инструментарием проведена оценка полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности) посредством анализа параметров: спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях, развитие ИИ, увеличение занятости, налогов, создание новых направлений труда, снижение технологической зависимости, укрепление технологического суверенитета, обеспечение ускорения темпов прироста инвестиций в основной капитал, стимулирование использования внутренних источников инвестиций, а также факторов риска: финансовый риск (субсидии), риск низкой стратегической значимости (отсутствие потенциала), недополучения промышленного эффекта от реализации технологии, риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии, риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости. Оценка изменения технологической независимости от внедрения технологии с учётом рисков и экономических факторов составляет 1,056 относится к категории низкая, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

Итогом практической реализации предложенного в диссертации методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий является комплексная оценка разработки и реализации технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины в соответствии с разработанной шкалой составляет 1,0933 (низкая, технология не рекомендуется к внедрению). Эффект предложенного экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении состоит в

уточнении существующих методов оценки эффективности технологий для науки, продукции, использующей технологию, предприятия-изготовителя и государства с учётом факторов риска.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К определяющим стратегическим целям экономической безопасности России относятся укрепление экономического и технологического суверенитета, повышение конкурентоспособности и устойчивости экономики к внешним и внутренним вызовам, а также достижение устойчивых темпов роста, превышающих среднемировые показатели в частности в двигателестроении. Анализ показывает, что основой достижения целей обеспечения экономической безопасности РФ, является технологическая независимость, разработка новых технологий. В нормативных правовых документах определены задачи повышения экономической безопасности РФ к которым можно отнести обеспечение структурной перестройки экономики на технологической основе, обеспечение темпов прироста инвестиций в основной капитал, устойчивого развития реального сектора экономики, создание высокотехнологичных производств, новых отраслей экономики, рынков товаров и услуг на основе перспективных высоких технологий, преодоление зависимости российской экономики от импорта технологий, форсированное развитие российского машиностроения, двигателестроения.

В Указе президента РФ «Стратегия НТР России» в качестве цели отмечена переориентация на передовые цифровые и интеллектуальные технологии производства, использование роботизированных систем; переход к использованию новых материалов и методов проектирования. В соответствии с федеральным законом N 523-ФЗ о технологической политике в РФ введены понятия критических и сквозных технологий. Ключевым инструментом достижения технологической независимости выступают проекты технологического суверенитета. Они охватывают полный инновационный цикл создания высокотехнологичной продукции на базе собственных разработок, с использованием критических и сквозных технологий. Такие проекты предусматривают не только реализацию

технологических этапов, но и решение кадровых, организационных и регуляторных задач. Правительством прогнозируется снижение коэффициента технологической зависимости РФ с 56,5% в 2025 году до 27,3% в 2030 году, в частности, за счёт разработки и внедрения КС технологий в системно значимых отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, двигателестроение), вследствие роста затрат на исследования и разработки до 146,3% в 2030 к уровню 2022 года. В двигателестроении планируется внедрение двигателей ПД-8, ПД-14, ВК-1600В.

Основными направлениями КС технологий являются: технологии в двигателестроении, технологии обработки и передачи данных (инновационное промышленное программное обеспечение и универсальные системные платформы, технологии доверенного цифрового взаимодействия и кибербезопасности, нейротехнологии, квантовые вычислительные системы и квантовое моделирование, а также виртуальная и дополненная реальности, технологии ИИ, в том числе машинное обучение, когнитивные системы и интеллектуальную аналитику) новые производственные технологии (технологии создания компонентов для робототехники и мехатронных систем, разработка и моделирование новых материалов и веществ с заданными свойствами).

Изучение особенностей современных технологий в двигателестроении показало, что сложность разработки многорежимных двигателей для сверхзвуковых самолетов обусловлена принципиальной противоположностью требований к их работе на различных режимах. Развитие технологий в двигателестроении привело к созданию трёхконтурных ДИП. Наиболее перспективными являются трехконтурные двигатели с адаптивным вентилятором. Трёхконтурная схема позволяет улучшить согласование входного устройства, двигателя и выходного устройства в составе силовой установки многоцелевого сверхзвукового ЛА. На дозвуковых крейсерских режимах полета за счет третьего контура удается добиться снижения расхода топлива на 7 – 11 %, на сверхзвуковых бесфорсажных режимах – на 3%. Основным положительным эффектом является

снижение сил внешнего сопротивления, что уменьшает нагрузку на двигатель и, соответственно, расход топлива.

Оценку эффективности продукции, технологий в экономике осуществляют с помощью показателей прибыли, рентабельности. В исследовании оценку предлагается осуществлять по критерию полезности. В микроэкономике полезность определяется в рамках теории предпочтений и кривых безразличия полезность используется для анализа выбора потребителя, где она является мерой удовлетворения от потребления определённого набора товаров. Современные подходы к трактовке полезности состоят в том, что в некоторых областях, например, в поведенческой экономике или нейроэкономике, исследуют более сложные, мультидисциплинарные и субъективные аспекты полезности. В исследовании обоснована классификация параметров оценки критических и сквозных технологий по принципу многоуровневости: полезность КС технологии для науки и техники, полезность для характеристик ВТП, предприятий производителей на основе риск-ориентированного подхода, полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства.

Одной из основных проблем разработки КС технологий является недостаточно точная предсказуемость эффекта для науки и для изменения характеристик ВТП, то есть существуют риски. Предлагается учитывать не только полезность, но и риски разработки и внедрения КСТ для науки, ВТП, предприятий изготовителей, государства. Под полезностью разработки и реализации технологии в исследовании понимается комплексный показатель изменения характеристик продукции, использующей технологию, предприятий изготовителей, уровня технологической независимости государства, оцениваемый в соответствии с разработанной шкалой. Данное диссертационное исследование основано на гипотезе многофакторности рисков как следствия проявления факторов неопределенности.

Цифровые аналоги предлагается рассматривать для моделирования полезности и рисков разработки и реализации КС технологий. Изучена модель

«Виртуального стенда», позволяющая удовлетворить требования газодинамической эффективности, прочности, массы и других параметров двигателя. Определена проблема многодисциплинарной оптимизации узлов авиационного двигателя, изучена технология её решения в цифровом пространстве виртуального стенда, в частности, технология формирования геометрических моделей лопаток компрессора авиационного двигателя. Обоснованы параметры полезности и рисков КС технологии в двигателестроении для науки и техники, продукции, предприятий изготовителей, независимости государства.

В диссертации проведён анализ методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции, однако в них не учитываются параметры полезности и рисков КС технологий. Предложенный методический подход оценки полезности разработки критических и сквозных технологий в двигателестроении включает аналитический этап (анализ характеристик ВТП, нормативной правовой базы, требований по улучшению характеристик двигателей, формирование баз данных по технологиям, оборудованию, композитным материалам). На втором этапе осуществляется разработка КС технологии посредством физико-математического моделирования, формирование цифровых аналогов, цифровое моделирование использования композитных материалов, комплектующих, формирование пространства цифровых аналогов двигателя, оценка влияния изменения материалов, конструкции ЦД на характеристики двигателя. На этапе оценки полезности разработки КС технологии с учётом рисков для науки и техники проводится оценка компонент полезности разработанной КС технологии двигателестроения и факторов риска, определяется показатель полезности разработки КС технологии для науки и техники с учётом риска и оценивается в соответствии с разработанной шкалой. На последнем этапе методического подхода оценивается полезность разработанной КС технологии для характеристик ВТП на основе анализа параметров полезности и факторов рисков.

Обоснованный в диссертации методический инструментарий оценки реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении включает

оценку полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков. определяется показатель полезности реализации КС технологии для ВТП и предприятия производителя с учётом рисков, оценка производится в соответствии с разработанной шкалой. Выделяется этап оценки полезности внедрения КС технологии для развития смежных отраслей, улучшения технологической независимости государства с учётом рисков. Определяется показатель изменения технологической независимости от внедрения КС технологии с учётом рисков, экономических факторов, который оценивается в соответствии с разработанной шкалой. В итоге formalизована комплексная оценка разработки и реализации критических и сквозных КС технологий в двигателестроении.

Разработанные в соответствии с задачами исследования методический подход и инструментарий составляют базис экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий двигателестроения в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска. Следствием работы механизма является система управленческих решений по разработке и реализации критических и сквозных технологий в разрезе: пилотируемые комплексы, двигатели, двигательные и энергетические установки, в т.ч. составные части, конструкция, прочность и материаловедение, связанных с обоснованием разработки и целесообразностью реализации КС технологии, с обоснованием финансирования производства ВТП с использованием КС технологий, развития сервисов, сопровождающих услуг, с обоснованием интеграции новых материалов и технологий.

В диссертации проведена практическая реализация методического подхода к оценке полезности разработки технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины) на основе анализа внутренних и внешних факторов риска и методического инструментария оценки реализации КСТ. На основе анализа параметров полезности для науки технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной

турбины: КПД, изменения системы охлаждения, повышения экономичности двигателя, увеличение тяги, улучшение подачи кислорода в прямоточный контур на больших высотах полета летательного аппарата, также факторов риска (температура, посадочная дистанция, вибрация и бафлинг, шум) проведена оценка полезности технологии для науки и техники. В соответствии с разработанным методическим подходом оценка полезности технологии для науки и техники с учётом рисков составляет 1,1727 и относится к категории средняя.

Проведена оценка полезности технологии для ВТП посредством анализа параметров полезности технологии для ВТП: масса, скорость, высота, манёвренность, лётные характеристики, надёжность, также факторов риска ухудшения характеристик систем, обеспечивающих управление ВТП, лётных характеристик. В соответствии с разработанным методическим подходом оценка полезности технологии для ВТП с учётом рисков составляет 1,180 , относится к категории средняя. В соответствии с разработанным методическим инструментарием проведена оценка полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для предприятия на основе анализа параметров полезности: выполнение требований заказчиков к ВТП, спрос на ВТП с использованием новой технологии, финансово-экономические показатели предприятия, а также факторов риска: сложность, время, финансовая возможность изменения производственной, материально-технической, кадровой базы. Оценка полезности технологии для ВТП. с учётом рисков составляет 0,97562 относится к категории отрицательная, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

В соответствии с разработанным методическим инструментарием проведена оценка полезности технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины для государства, развития смежных отраслей (в соответствии с концепцией национальной безопасности) посредством анализа параметров: спрос на продукцию, услуги в смежных отраслях, развитие ИИ, увеличение занятости, налогов, создание новых направлений труда, снижение технологической

зависимости, укрепление технологического суверенитета, обеспечение ускорения темпов прироста инвестиций в основной капитал, стимулирование использования внутренних источников инвестиций, а также факторов риска: финансовый риск (субсидии), риск низкой стратегической значимости (отсутствие потенциала), недополучения промышленного эффекта от реализации технологии, риск неформирования долгосрочного спроса и предложения ВТП с использованием технологии, риск неизменения (ухудшения) технологической зависимости. Оценка изменения технологической независимости от внедрения технологии с учётом рисков и экономических факторов составляет 1,056 относится к категории низкая, то есть технология не рекомендуется к внедрению.

Итогом практической реализации предложенного в диссертации методического инструментария оценки реализации критических и сквозных технологий является комплексная оценка разработки и реализации технологии многокритериальной оптимизации компрессора авиационного двигателя, турбины газогенератора и свободной турбины в соответствии с разработанной шкалой составляет 1,0933 (низкая, технология не рекомендуется к внедрению).

Разработанный методический подход и инструментарий является дополнением методов оценки эффективности проектов и позволяет обосновать выбор ЦД для производства с учётом совокупности экономических, технических, технологических факторов. Эффект предложенного экономического механизма комплексной оценки разработки и реализации критических и сквозных технологий в двигателестроении в цифровом пространстве принятия решений на основе анализа факторов риска реализован посредством уточнения существующих методов оценки эффективности технологий для науки, продукции, использующей технологию, предприятия-изготовителя и государства (в аспекте изменения уровня технологической независимости). Такой сценарий использования разработанного механизма способствует экономическому развитию предприятий обеспечивающих отраслей.

Результаты диссертационного исследования апробированы на действующих предприятиях ОКБ им. А. Люльки-филиал ПАО «ОДК-УМПО», ОАО «ЛИИП им.

Гризобудовой В.С.», АО «ЛИИ им. М.М. Громова», что подтверждается актами о внедрении.

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

АП – Авиационная промышленность

АТ – Авиационная техника

БПЛА – Беспилотный летательный аппарат

ВТП – Высокотехнологичная продукция авиастроения

ЖЦ – Жизненный цикл

КМ – Композитные материалы

НС – Нейронная сеть

ПА – предприятие авиастроения

РФ – Российская Федерация

СР – Стратегическое развитие

ТР – Тактическое развитие

УСР – Уровень стратегического развития

УТР – Уровень тактического развития

ФЗ – Федеральный закон

ЦД – Цифровой двойник

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Нормативные правовые акты*

1. Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ (ред. от 31.12.2017) «О стратегическом планировании в Российской Федерации».
2. Федеральный закон от 29.12.2012 г. № 275-ФЗ «О государственном оборонном заказе» (в редакции Федеральных законов от 22.07.2024 г.).
3. Федеральный закон от 28.12.2024 № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
4. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.1995 г. № 221 «О мерах по упорядочению государственного регулирования цен (тарифов)».
5. Указ Президента РФ от 01.04.1996 № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию».
6. Указ Президента РФ от 07.05.2012 № 596 «О долгосрочной государственной экономической политике».
7. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 года № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
8. Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации».
9. Указ Президента от 02.07.2021 № 400 «Стратегия национальной безопасности Российской Федерации».
10. Указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации».
11. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.07.1997 № 660 «О ценах на продукцию оборонного назначения, поставляемую по государственному оборонному заказу».
12. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.01.1998 № 47 «О Правилах ведения организациями, выполняющими государственный заказ за

счет средств федерального бюджета, раздельного учета результатов финансово – хозяйственной деятельности».

13. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.10.1999 № 1141 «О государственном регулировании внутреннего ценообразования в отношении оплачиваемой за счет средств федерального бюджета продукции военного назначения, предназначеннной для поставок на экспорт» (извлечение).

14. Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 N 303 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности».

15. Постановление Правительства РФ от 31.10.2018 №1288 «Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации».

16. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.03.2019 №377 об утверждении государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

17. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.04.2025 №571 утвердило «Правила определения показателей эффективности мер и инструментов государственной политики в области научно-технологического развития Российской Федерации».

18. Распоряжение Правительства РФ от 27.11.2021 №3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года».

19. Распоряжение Правительства РФ от 25.06.2022 №1693-р (ред. от 04.05.2024) «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли РФ до 2030 года».

20. Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 N 1315-р «Концепция технологического развития на период до 2030 года».

21. Распоряжение Правительства РФ от 21.06.2023 N 1630-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации

Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года и плана мероприятий по ее реализации».

22. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р.

23. Методические рекомендации по применению методов определения начальной (максимальной) цены контракта, цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), утв. приказом Минэкономразвития России от 02.10.2013 г. № 567.

24. Методические рекомендации по определению цен на вооружение, военную и специальную технику, поставляемые по государственному оборонному заказу единственными поставщиками, определяемыми в установленном порядке Президентом Российской Федерации или Правительством Российской Федерации (одобрены ВПК при Правительстве Российской Федерации протоколом от 19.12.2012 г. № 13с).

25. Методические рекомендации по определению цен на работы по ремонту образцов вооружения, военной и специальной техники, выполняемые по государственному оборонному заказу единственными исполнителями, определяемыми в установленном порядке Президентом Российской Федерации или Правительством Российской Федерации (одобрены ВПК при Правительстве Российской Федерации протоколом от 19.12.2012 г. № 13с).

26. Методические рекомендации по определению цен на работы по сервисному обслуживанию образцов вооружения, военной и специальной техники, выполняемые по государственному оборонному заказу единственными исполнителями, определяемыми в установленном порядке Президентом Российской Федерации или Правительством Российской Федерации (одобрены ВПК при Правительстве Российской Федерации протоколом от 19.12.2012 г. № 13с).

27. Приказ Минпромторга РФ от 01.11.2012 N 1618 «Об утверждении критериев отнесения товаров, работ и услуг к инновационной продукции и (или)

высокотехнологичной продукции по отраслям, относящимся к установленной сфере деятельности министерства промышленности и торговли российской федерации».

28. Приказ Минэкономразвития России от 10.04.2025 N 222 «Об утверждении методических рекомендаций по расчету показателя достигнутого уровня технологической независимости высокотехнологичной продукции».

29. Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 08 декабря 2011 г. № 2227-р.

30. Проект Государственной программы Российской Федерации «Стратегия развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года».

31. Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейtronных исследований и исследовательской инфраструктуры утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 года №287.

#### *Учебные пособия и монографии*

32. Азрилиян, А.Н. Большой экономический словарь / А.Н. Азрилян – М.: Институт новой экономики, 1997 – 1376 с.

33. Ainley D.G. and Mathieson, G.C.R., 1951, "An Examination of the Flow and Pressure Losses in Blade Rows of Axial-Flow Turbines," N.G.T.E. Report R.86

34. Ансофф, И. Новая корпоративная стратегия / И. Ансофф. - СПб: Питер Ком, 1999. - 416 с. - (Серия «Теория и практика менеджмента»).

35. Артеменко И.В. Ценообразование на оборонную продукцию: Учебное пособие. М.: МАИ. 2010.

36. Бармашова, Л.В. Концептуальные аспекты устойчивого развития предприятия: монография / Л.В. Бармашова, Е.Н. Кучерова; М-во

образования и науки Российской Федерации, Фил. Гос. образовательного учреждения высш. проф. образования Московского гос. индустриального ун-та в г. Вязьме Смоленской обл. (ВФ ГОУ МГИУ). - Вязьма: ВФ ГОУ МГИУ, 2010. – 93 с.

37. Баутин, Н.А. Устойчивое развитие предприятий на основе рационального использования ресурсов [Текст] : монография / В.М. Баутин, Н.А. Серебрякова, В.М. Сидоров; М-во образования и науки РФ, ГОУВПО "Воронежская гос. технологическая акад.". - Воронеж: ВГТА, 2011. - 120 с.

38. Белов, П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование в 3 ч. Часть 3 : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / П.Г. Белов. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 272 с.

39. Булава, И.В. Теория и методология разработки стратегии предприятия / И.В. Булава [и др.]; - М.: Международная академия оценки и консалтинга: РИО МАОК, 2009 - 278 с.

40. Воронцовский, А.В. Оценка рисков: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / А. В. Воронцовский. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 179 с.

41. GIESING J.P. and BARTHELEMY J.F., A Summary of Industry MDO Applications and Needs, AIAA-98-4737, 1998;

42. Гэлаи, Д. Основы риск-менеджмента / Д. Гэлаи, М. Кроуи, В. Б. Минасян, Р. Марк. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 390 с.

43. Гончарук Е.Ю. Рекомендации по организации и ведению раздельного учета затрат при выполнении государственного оборонного заказа: практическое пособие для специалистов в сфере государственного оборонного заказа/ Гончарук Е.Ю., [и др.]. – М.: Экспертно–аналитический центр ценообразования в оборонной промышленности «Эксперт 275». 2017. 335 с.

44. Гурков, И.Б. Стратегия и структура корпорации: учеб. пособие / И.Б. Гурков. – 2е изд., перераб. – М.: Издательство «Дело» АНХ, 2008. – 288 с. – (Серия «Управление корпорацией»).

45. Гусева, Р.И. Особенности технологии сборки планера самолета: учеб. пособие / Р.И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 133 с.
46. Johnsen, I.A. and Bullock, R.O. (eds), 1965, "Aerodynamic Design of Axial-Flow Compressors," NASA SP-36
47. Игонина, Л.Л. Инвестиции: учеб. пособие / Л.Л. Игонина; под ред. д-ра экон. наук, проф. В.А. Слепова. — М.: Экономисту 2005. — 478 с.
48. Исаков, Н. Устойчивое развитие: наука и практика / Н. Исаков / монография. - М.: РАЕН, 2008. - 464 с.
49. Крылов, Э.И. Анализ эффективности инвестиционной и инновационной деятельности предприятия: Учеб. Пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Э.И. Крылов, В.М. Власова, И.В., Журавкова. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 608 с.: - ил.
50. Лахметкина, Н.И. Инвестиционная стратегия предприятия : учебное пособие / Н.И. Лахметкина. - М.: КНОРУС, 2006. - 184 с.
51. Лешкевич, Т.Г. Философия: Курс лекций / Т.Г. Лешкевич - М.: ИНФРА-М, 2000. - 240 с. - (Серия «Высшее образование»).
52. Матвеевский, В. Надежность технических систем: учебное пособие / В. Матвеевский. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. – 113с.
53. Moustapha, S.H., Kacker, S.C., and Tremblay, B., "An Improved Incidence Losses Prediction Method for Turbine Airfoils," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 112, April, pp. 267-276, 1990
54. Нечаев, Ю.Н. Авиационные турбореактивные двигатели с изменяемым рабочим процессом для многорежимных самолетов / Нечаев Ю.Н., Кобельков В.Н., Полев А.С. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.
55. Найт Ф.Х. Риск, неопределенность и прибыль / Пер. с англ. - М.: Дело, 2003. - 360 с.
56. Осипов, Ю.М. Курс философии хозяйства. — М.: Экономиста, 2005. — 320 с.

57. Прохоров, А.М. Большой энциклопедический словарь/Главный редактор А.М. Прохоров. - Советская энциклопедия, Фонд «Ленинградская галерея». - 1993. – с. 1632.
58. Прохоров, А. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / А. Прохоров, М. Лысачев – Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО "АльянсПринт", 2020. – 401 стр.
59. Рутковская, Д Нейронные сети, генетические алгоритмы нечеткие системы: Пер. с польского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия Телеком, 2006. – 452 с.
60. Рягин, Ю. И. Рискология в 2 ч. Часть 1: учебник для вузов / Ю.И. Рягин. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 255 с.
61. Рягин, Ю. И. Рискология в 2 ч. Часть 2: учебник для вузов / Ю.И. Рягин. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 275 с.
62. Скибин, В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор)/ В.А. Скибин, В.И. Солонин, В.А. Палкин / Под общей редакцией д.т.н. В.А. Скибина и к.т.н. В.И. Солонина. М., ЦИАМ, 2010, 678 с.
63. Соболь, И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М. Соболь. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
64. STADLER W. (ed.), Multicriteria optimization in engineering and in the science, Plenum Press, New York, 1988;
65. Старовойтов, М.К. Практический инструментарий организации управления промышленным предприятием / М.К. Старовойтов, П.А. Фомин. - М.: Высшая школа, 2002. - 267 с.
66. Старовойтов, М.К. Устойчивое развитие предприятия как фактор преодоления кризиса: монография / М.К. Старовойтов, Г.И. Лукьянов, Н.И. Ломакин; М-во образования и науки РФ, Волжский политехнический ин-т (фил.) Федерального гос. бюджетного образовательного учреждения высш. проф. образования "Волгоградский гос. технический ун-т". - Волгоград : ВолгГТУ, 2011. - 142 с.

67. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник. Кн. 3. Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / В.В. Кулагин, С.К. Бочкарёв, И.М. Горюнов и др.; Под общ. Ред. В.В. Кулагина. - М.: Машиностроение, 2005. - 464 с.

68. Теслинов, А.Г. Концептуальное проектирование сложных решений / А.Г. Теслинов. – СПб: “Питер”, 2009. – 288 с.

69. Трухаев Р. И. Методы исследования процессов принятия решений в условиях неопределенности: Учеб. пособие / Р. И. Трухаев ; Воен.-морская акад. - Ленинград : [б. и.], 1972. - 436 с.,

70. Хайкин, С. Нейронные сети: Полный курс: Пер. с анг. / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

71. Хоминич, И.П. Финансы организаций: управление финансовыми рисками: учебник и практикум для СПО / И.П. Хоминич [и др.]; под ред. И.П. Хоминич, И.В. Пещанской. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 345 с.

72. Хоминич, И.П. Управление финансовыми рисками: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / И.П. Хоминич [и др.]; под ред. И.П. Хоминич, И.В. Пещанской. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 345 с.

### *Статьи*

73. Бобков, И.А. Методический подход к экономическому обоснованию целесообразности формирования цифровых двойников БПЛА / И.А. Бобков // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2023. – № 4.

74. Бондаренко, А.В. Алгоритм формирования системы показателей мониторинга и контроля выполнения Программы развития отрасли авиационной промышленности / А.В. Бондаренко // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». - Москва. Тезисы. – Типография «Люксор». - 2018. – с. 569 – 570.

75. Бородухин, Д.С. Экономическое обеспечение устойчивого развития системы электроэнергетики в условиях модернизации экономики России / Д.С. Бородухин // Вестник МГТУ. - том 14. - №1. - 2011. - с.187-194.
76. Владычек, В.С. Вопросы обеспечения экономической безопасности предприятия авиационной промышленности // Вестник Университета. – 2014. – №21. – с. 71-76.
77. Вовк, М.Ю. Третий контур – анализ возможностей. Перспективы использования / М.Ю. Вовк, Е.Ю. Дрыгин, Ю.А. Эзрохи // Сб. тезисов «Авиадвигатели XXI века. Москва 24-27 ноября 2015 г. – М.: ЦИАМ, 2015.
78. Дрыгин, А.С. Применение технологий третьего контура для повышения крейсерской топливной экономичности многорежимного авиационного двигателя / А.С. Дрыгин, И.С. Кизеев, Ю.А. Эзрохи, М.Ю. Вовк // Сб. тезисов «Авиадвигатели XXI века. Москва 24-27 ноября 2015 г. – М.: ЦИАМ, 2015.
79. Dunham, J. and Came, P.M., 1970, "Improvements to the Ainley-Mathieson Method of Turbine Performance Prediction," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, July, pp. 252-256.
80. Каблов, Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки / Е.Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90. № 4. – с.331-334.
81. Каблов, Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 / Е.Н. Каблов// Крылья Родины. –2019. – № 7-8. – с. 54-58.
82. Kacker, S.C., and Okapuu, U., 1982, "A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, 104[1], pp. 111-119
83. Koch, C.C., and Smith, L.H. Jr., 1976, "Loss Sources and Magnitudes in Axial-Flow Compressors," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, No. 3, pp. 411-424
84. Кравченко П.Д. Проблемы ценообразования при формировании государственного оборонного заказа // Вооружение и экономика. 2010. № 4 (12). С. 33-37.

85. Кулибин, А. Ход реализации в США программы создания перспективного авиационного ГТД / А. Кулибин. – М.: Зарубежное военное обозрение, 2013. №6. - С. 64-67.
86. Kulikova, N.N. Planning of technological development of new products and its impact on the economic performance of the enterprise / N.N. Kulikova, V.M. Smolentsev, A.I. Tikhonov, V.S. Kireev, V.A. Dikareva // International Journal of Economics and Financial Issues. – 6 (8S). – 2016. – p. 213-219.
87. Кучерова, Е.Н. Современный подход к устойчивому развитию предприятия / Е.Н. Кучерова // Вестник ОГУ. - №9. – 2007. – с.76-81.
88. Лещенко, И.А. Исследование эффективности независимого управляемого 3-го контура в силовой установке многоцелевого самолёта / И.А. Лещенко, Ю.Н. Шмотин, К.С. Федечкин, Н.В. Кикоть // Сб. тезисов «Авиадвигатели XXI века. Москва 24-27 ноября 2015 г. – М.: ЦИАМ, 2015.
89. Лещенко, И.А. Программный комплекс UNI\_MM для выполнения термогазодинамических расчётов ТРДД. Опыт разработки и использования / И.А. Лещенко, Е.Ю. Марчуков, М.Ю. Вовк, А.А. Инюкин // Сб. тезисов «Авиадвигатели XXI века. Москва 24-27 ноября 2015 г. – М.: ЦИАМ, 2015.
90. Малая, Е.В. Композиционные материалы в современной авиации / Малая Е. В., Саввин А. И. // Актуальные исследования. – 2022. – №49 (128). – с. 60-65
91. Мацова, А.С. Теоретические аспекты формирования устойчивого развития предприятия // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского, Серия «Экономика и управление». Том 25 (64). - 2012. № 4. - с. 150-161. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://sn-econmanag.crimea.edu/arhiv/2012/uch\\_25\\_4econ/016matcova.pdf](http://sn-econmanag.crimea.edu/arhiv/2012/uch_25_4econ/016matcova.pdf)
92. Меркулов В.И., Забелин И.В., Шуклин А.И., Трегубенков С.Ю. Исследование чувствительности к точности измерителей алгоритмов траекторного управления самолетом при наведении на наземную цель с адаптацией к режимам работы бортовой РЛС // Радиотехника. 2011. № 6. С. 117-120
93. Набиева Д.Г. Анализ современного состояния и перспектив развития двигателестроения//Бородина Н.А// Аналитический журнал «РИСК», 2024, № 2, с.

102-107

94. Набиева Д.Г. Вопросы разработки модели расчета стоимости летного часа авиационного двигателя/ Климов В.Г., Масляков Д.В./// Социальные и экономические системы. 2022. № 6-4 (33). С. 304-312.

95. Набиева Д.Г. Методический инструментарий оценки факторов создания высокотехнологичной продукции двигателестроения нового поколения//Научно-практический теоретический журнал «Экономика и управление: проблемы, решения», 2025, № 1, том 7 (154), с. 21-28

96. Набиева Д.Г. Методический подход к технико-экономической оптимизации узлов вертолетного двигателя нового поколения/Бурдина А.А// Аналитический журнал «РИСК», 2024, № 2, с.61-67

97. Набиева Д.Г. Методический подход к оценке комплексной реализуемости производства цифрового двойника авиационного двигателя. /Научно-аналитический журнал по экономике и финансам «Финансовый бизнес», 2025, № 1, с. 61-64

98. Набиева Д.Г. Оценка эффективности цифрового моделирования при проектировании авиационных/Трегубенков С.Ю// материалы 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика

99. Набиева Д.Г. Оценка эффективности внедрения цифрового моделирования при производстве авиационных двигателей нового поколения//Бурдина А.А., Трегубенков С.Ю., Филина И.И./ материалы конференции XLVII Академические чтения по космонавтике, 25 января 2023 года

100. Набиева Д.Г. Оценка реализуемости проекта создания продукции авиационного двигателестроения нового поколения/Трегубенков С.Ю//материалы Международной научно-практической конференции «Управление и инновационное развитие предприятия: новые подходы и актуальные исследования (УИРП-2024)

101. Набиева Д.Г. Подходы к оценке эффективности реализации многоуровневых и многодисциплинарных моделей в двигателестроении/ Трегубенков Сергей Юрьевич// материалы 20-ой Международной конференции

«Авиация и космонавтика», 24 ноября 2021 года

102. Набиева Д.Г. Подходы к управлению полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции двигателестроения/Трегубенков С.Ю./// материалы I Всероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста», 8 декабря 2021 года

103. Набиева Д.Г. Подходы к оценке комплексной эффективности разработки и создания авиационных двигателей нового поколения/Бурдина А.А., Горелов Б.А./// материалы конференции XLVI Академические чтения по космонавтике, 26 января 2022 года

104. Набиева Д.Г. Рекомендации по совершенствованию моделирования цифрового аналога двигателя нового поколения/Трегубенков С.Ю., Филина И.И.///

материалы 21-ой Международной конференция «Авиация и космонавтика», 25 ноября 2022 года

105. Набиева Д.Г. Эффективность создания цифровых двойников компонент авиационной техники/ Бурдина А.А., Москвичева Н.В./// СТИН. 2023. № 9. С. 61-64.

106. Nabieva D. Effectiveness of Testing Digital Twins of Aircraft Components/ A. A. Burdina, N. V. Moskvicheva// Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, Volume 12, Issue 2 || ISSN: 2168-9792

107. Нехрест-Бобкова, А.А. Совершенствование процедуры контроллинга финансового результата с помощью нейросетевого моделирования / А.А. Нехрест-Бобкова, А.А. Бурдина, Н.Н. Геращенко // Экономика и предпринимательство – № 6 – 2019. – с. 703-709.

108. Рымкевич, В. В. Неопределенность в экономике и формы ее проявления / В.В. Рымкевич // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 1999. – № 4. – с. 46-52.

109. Солонин, В.Н. разработка США технологий создания двигателей шестого поколения для боевой авиации / В.Н. Солонин, В.А. Палкин – М.: Актуальная тема, 2014. № 4 (94) – С. 2-7.
110. Тимошков, П.Н. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) / П.Н. Тимошков, В.А Гончаров, М.Н. Усачева, А.В. Хрульков // Труды ВИАМ. – 2022. – №1 (107). – с. 66–75
111. Трегубенков С.Ю. Управление тактическим и стратегическим развитием промышленного предприятия // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. - 2025.- № 2. - С. 57-68.
112. Трегубенков С.Ю., Васильев Д. А., Бурдина Е. С. Методический инструментарий оценки стратегического развития системно высокотехнологичных предприятий // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. - 2025.- № 1. - С. 69-74.
113. Трегубенков С.Ю., Нехрест-Бобкова А.А., Красноперов П. М. Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. Т. 1, № 9. С. 4–12. ISSN, 2227-3891 (print), ISSN 2308-927X (online), Россия
114. Трегубенков С.Ю., Краснов А.М., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Методика оценки эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. модель шума системы "ОЭС-оператор" / Трегубенков С.Ю., Краснов А.М., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. // Труды МАИ. 2022. № 122.
115. Трегубенков С.Ю., Краснов А.М., Румянцев А.В., Хисматов Р.Ф., Шашков С.Н. Оценка эффективности оптико-электронных систем посредством аналитической модели. Функции порогового контраста и передачи модуляции / Трегубенков С.Ю., Кудякин Р.А., Горелов Б.А., Бурдина А.А. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19. № 1. С. 45-64
116. Трегубенков С.Ю., Бурдина А.А., Горелов Б.А., Тужиков Е.З. Определение численности работников административноуправленческого и вспомогательного персонала при создании продукции военного назначения на

основе нейросетевого моделирования / Трегубенков С.Ю., Бурдина А.А., Горелов Б.А., Тужиков Е.З. // Стратегическая стабильность. 2021. № 1 (94). С. 43-49.

117. Трегубенков С. Ю., Детков А.Н., Шуклин А.И. Оценка влияния ошибок измерителей на точность формирования параметров рассогласования при радиолокационно-спутниковом методе наведения ракет класса «воздух-поверхность» / Трегубенков С.Ю. , Детков А.Н., Шуклин А.И. // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 8-9

118. Чемерисова, А.В. Процедура оценки устойчивого развития предприятий авиационной промышленности с учетом особенностей трудового потенциала / А.В. Чемерисова, Б.И. Редько // Сборник тезисов докладов «Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция». Том 4. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - 2016. - с. 654.

119. Чемерисова, А.В. Вопросы финансового обеспечения предприятий авиационной промышленности с учетом характеристик трудового потенциала // Сборник научных трудов междунар. науч.-практ. конф. «Финансовые решения XXI века: теория и практика». - СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. - 2016. – с. 526.

### *Диссертации*

120. Батырмурзаева, З.М. Обеспечение устойчивого развития промышленных предприятий на основе адаптивной системы управления (на примере нефтегазодобывающей отрасли республики Дагестан) // дис. ... канд. эконом. наук: 08.00.05 / Батырмурзаева Зульфия Магомедназировна. – Москва, 2015. - 181 с.

121. Бобков И. А. Экономический механизм управления разработкой высокотехнологичной продукции авиастроения на основе анализа неопределённостей: дис. ...канд. эконом. наук: 5.2.3/ Бобков Илья Алексеевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет]. - Москва, 2024. - 164 с.

122. Жукова, И. В. Организационно-экономический механизм взаимодействия предприятий в льноводческо-текстильном подкомплексе АПК : На материалах Алтайского края : дис. ... кандидата эконом. наук: 08.00.05 / Жукова, Инна Владимировна [Место защиты: Алт. гос. ун-т]. - Барнаул, 2004. - 181 с.

123. Ильин, Е.С. Интеллектуальная система анализа данных на основе нейронных сетей // дисс. ... канд. техн. наук 05.13.01 / Ильин Евгений Сергеевич [Место защиты: Сиб. аэрокосм. акад. им. акад. М.Ф. Решетнева]. – Красноярск, 2004. – 174с.

124. Гилев, С.Е. Обучение нейронных сетей: Методы, алгоритмы, тестовые испытания // дисс. ... канд. физ. мат. наук 05.13.16 / Гилев Сергей Евгеньевич [Место защиты: Калининградский государственный технический университет]. – Калининград, 1997. – 187с

125. Науменко, Е.Е. Управление устойчивым развитием предприятия // дис. ... канд. эконом. наук: 08.00.05 / Науменко Егор Евгеньевич; [Место защиты: С.-Петербург. гос. ун-т экономики и финансов]. - Санкт-Петербург, 2009. - 165 с.

#### *Электронные ресурсы*

126. Владимиров Л., Атака из поднебесья. Обзор современных боевых и разведывательно-ударных БЛА. Часть 3, /Журнал «Аэрокосмическое обозрение» 5-2011. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-air/bla-chast-3/>

127. Гончарук, В.А. Внедрение изменений на предприятии / В.А. Гончарук. Москва, 1999. – 102 с. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.goncharuk.ru/?page=14>

128. Ежеквартальная информация об исполнении федерального бюджета (данные с 1 января 2011 г.) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mfinfin.ru/ru/statistics/fedbud/execute/#ixzz55mUZyICg>

129. Официальный сайт Министерства экономического развития Российской Федерации. Методические указания по разработке (актуализации) программ инновационного развития акционерных обществ с государственным

участием, государственных корпораций и федеральных государственных унитарных предприятий [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://economy.gov.ru/minec/about/structure/depino/201507035473>

130. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>

131. Официальный сайт Минпромторга России. Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.minpromtorg.gov.ru>.

132. Официальный сайт <http://www.iosotech.com/ru/index.htm>

133. Патент № 2189482 <http://www.findpatent.ru/patent/218/2189482.html>

134. Патент №2197627 <http://www.findpatent.ru/patent/219/2197627.html>

135. Паршин М.А., Круглов Д.А. Переход России к шестому технологическому укладу: возможности и риски // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 5. Ч. 2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://web.s nauka.ru/issues/2014/05/33059>

136. Теория экономических механизмов (Нобелевская премия по экономике 2007 г. Часть № 1) [Электронный ресурс]. URL: <http://institutiones.com/theories/259-2007-1.html/>

137. Т-БАС: беспилотные грузоперевозки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://russiandrone.ru/publications/t-bas-bespilotnye-gruzoperevozki/>

138. Официальный сайт ФГУП «ВИАМ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://viam.ru/> Официальный сайт Объединенной авиастроительной корпорации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.uacrussia.ru/>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОГО АНАЛИЗА  
И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА  
АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Турбина газогенератора является наиболее нагруженным из узлов авиационного двигателя. Турбина газогенератора вращается с большой частотой вращения, а также работает в условиях высоких температур.

На этапе проектирования и доводки к турбине газогенератора предъявляются следующие требования:

1. Максимально высокое значение КПД;
2. Достаточные запасы статической и динамической прочности;
3. Минимальная масса;
4. Надежность работы во всём диапазоне режимов в течении всего срока эксплуатации;
5. Ряд конструктивных требований (технологичность, ремонтопригодность и т.д.).

Мероприятия по улучшению какого-либо одного требования к турбине газогенератора, как правило, приводят к ухудшению других. Таким образом, наилучшим оказывается некий компромиссный вариант.

Поиск оптимального варианта турбины газогенератора затруднён по нескольким причинам. Во-первых, геометрия турбины газогенератора может описываться сотнями переменных, изменение каждой из которых может оказать противоречивое влияния на её рабочий процесс. Во-вторых, необходим некий математический аппарат, позволяющий предсказать с достаточной степенью точности, как повлияет изменение геометрии турбины газогенератора на параметры её рабочего процесса. Также необходима выработка стратегии поиска оптимального варианта, выбор которой зависит от конструктивных особенностей турбины газогенератора. Очевидно, что решение задачи поиска оптимального варианта турбины газогенератора длительная и трудоемкая задача, для решения

которой целесообразно использовать средства автоматизации инженерных расчётов.

Цикл проектирования турбины газогенератора традиционно разделяют на этапы газодинамического и прочностного проектирования.

Целью газодинамического проектирования турбины газогенератора является поиск геометрии лопаток, обеспечивающих генерацию требуемой мощности на валу с максимальным значением КПД. При этом значения параметров, определяющих облик турбины газогенератора в составе двигателя должны обеспечиваться с требуемыми допусками. Это такие параметры, как степень расширения газа в турбине  $\pi_T^*$ , угол потока на выходе из турбины  $\alpha_{\text{вых}}$ , расход рабочего тела  $G$  и другие.

Целью прочностного проектирования рабочих колес турбин газогенератора является обеспечение статической и динамической прочности конструкции при минимально возможной массе с учетом конструктивно-технологических ограничений. Конструкция должна стablyно функционировать в течение заданного ресурса и условий эксплуатации. Прочностные требования включают обеспечение нормируемых запасов по кратковременной и длительной прочности, МЦУ, MnЦУ и несущей способности. При оптимизации рабочих колес необходимо учитывать требование к отстройке их частотного спектра от опасных резонансов.

В процессе поиска оптимального варианта турбины газогенератора, меняется геометрия лопаток соплового аппарата и рабочего колеса, что приводит не только к изменению протекания газодинамических процессов в ней, но также к изменению напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток. Вариант турбины газогенератора, оптимальный с точки зрения газовой динамики, может не удовлетворять прочностным требованиям. И наоборот, вариант турбины газогенератора, удовлетворяющий прочностным требованиям, может не удовлетворять требованиям газовой динамики.

Исходя из вышеизложенного следует, что в процессе проектирования, модернизации и доводки турбины газогенератора требуется обеспечить выполнение множества проектных требований и ограничений. Кроме того,

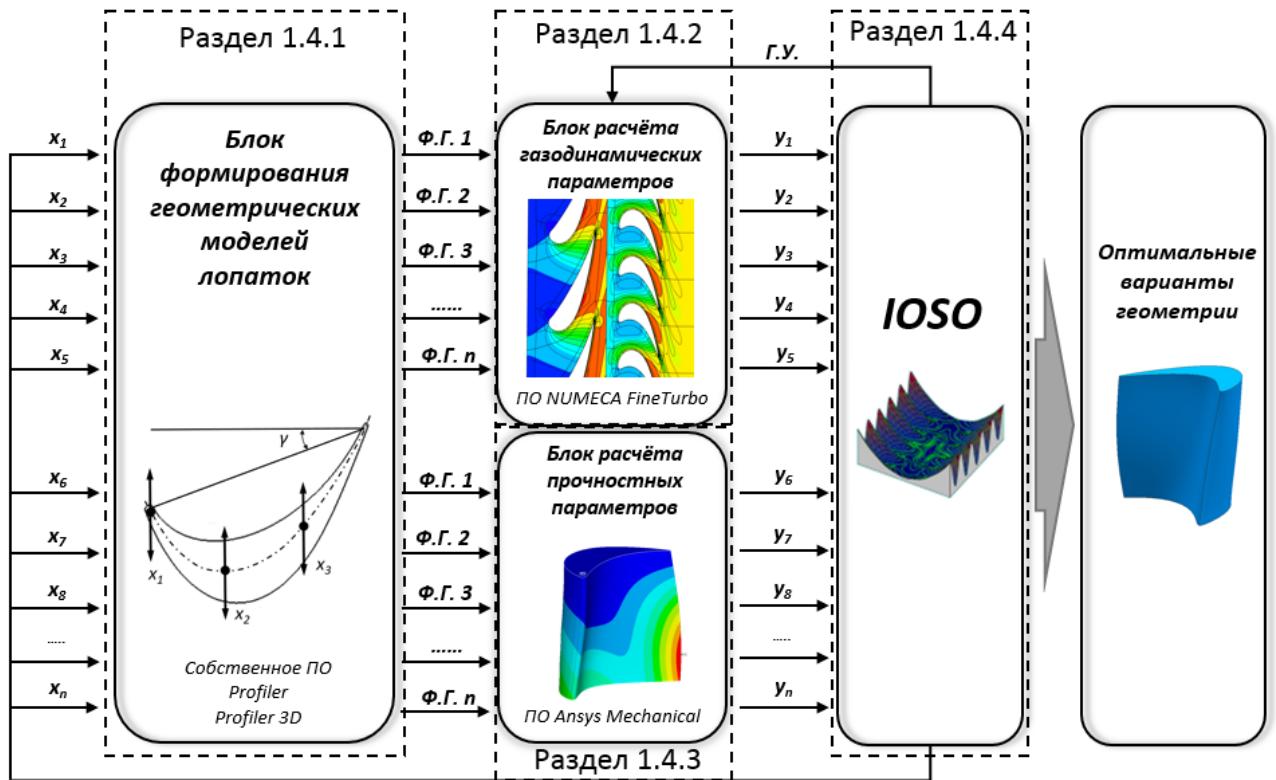
количество переменных, описывающих геометрию турбины газогенератора, может достигать сотни, а изменение каждой из них может оказаться противоречивое влияние на рабочий процесс и прочностное состояние турбины газогенератора. Эффективным средством, позволяющим решать задачу проектирования турбины газогенератора в таких условиях, является применение методов оптимизации, которые позволяют осуществлять поиск наилучшей конфигурации турбины газогенератора в автоматическом режиме для заданных условий эксплуатации. В частности, таким средством является программа-оптимизатор *IOSO*.

Для проектирования и доводки турбины газогенератора авиационного двигателя была разработана методология многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации турбины газогенератора в автоматизированном режиме под управлением программы *IOSO*. Принципиальная схема разработанной методологии показана на рисунке 1.4.1 и состоит из нескольких блоков.

На первом этапе программа-оптимизатор *IOSO* формирует вектор входных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Значения этих параметров в автоматическом режиме записываются в текстовые файлы, описывающие геометрию лопаток в параметрическом виде. Затем программы - профилировщики *Profiler* и *Profiler 3D* считывают созданные текстовые файлы и формируют файлы  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$  с геометрией лопаток в формате *geomturbo* пригодном для CAE-программных комплексов *NUMECA FineTurbo* и *Ansys*.

На втором этапе созданный набор файлов передается в блок расчёта газодинамических параметров и блок прочностного анализа. В блоке расчёта газодинамических параметров созданные на предыдущем этапе файлы геометрии  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$  загружаются в расчётную сеть, которая в дальнейшем используется для расчёта газодинамических параметров рабочего процесса турбины газогенератора на требуемом режиме работы в программном комплексе *NUMECA FineTurbo*. Также в проект *NUMECA FineTurbo* загружается файл с граничными условиями рабочего процесса турбины газогенератора, которые могут варьироваться в процессе оптимизации. После расчёта формируется файл, содержащий значения выходных параметров, таких как степень расширения газа в

турбине  $\pi_T^*$ , угла потока на выходе из турбины  $\alpha_{\text{вых}}$ , расхода рабочего тела  $G$  кг/с и других.



Источник: составлено автором

Рисунок А.1. Принципиальная схема разработанной методологии многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации турбины газогенератора авиационного двигателя

В блоке расчёта прочностных параметров на основе файлов геометрии  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$  создается КЭ сеть модифицированных лопаток рабочих колёс и осуществляется расчёт их напряжённо – деформированного состояния в программном комплексе *Ansys Mechanical*. После расчёта формируется текстовый файл, содержащий рассчитанные параметры напряжённо – деформированного состояния рабочих лопаток турбины газогенератора.

На основе тестовых файлов, содержащих значения рассчитанных параметров рабочего процесса и напряжённо – деформированного состояния турбины газогенератора формируется вектор выходных параметров и ограничений  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ , который передается в программный комплекс *IOSO*, где осуществляется обработка и анализ полученных результатов, выбираются оптимальные варианты

турбины газогенератора, а также формируется новый набор входных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

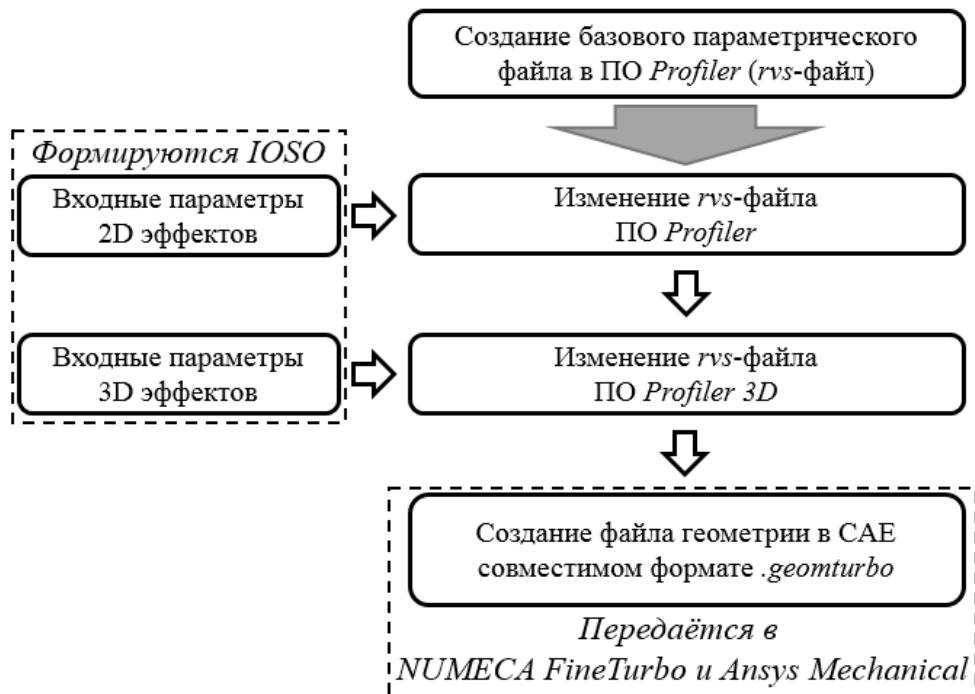
Данный процесс является итеративным и выполняется до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые параметры турбины газогенератора.

Детальное описание каждого из блоков приведено ниже.

### **Блок формирования геометрических моделей лопаток турбины газогенератора**

Блок формирования геометрических моделей лопаток турбины газогенератора (рисунок 1.4.2) предназначен для автоматизированного создания файлов, содержащих информацию о геометрии лопаток в формате *geomturbo*, совместимом с программными комплексами *NUMECA FineTurbo* и *Ansys Mechanical*.

Исходными данными для построения параметрических геометрических моделей лопаток являются её чертежи. В программе *Profilerc* создаётся параметрическая геометрическая модель каждой лопатки турбины газогенератора (текстовые файлы формата *rvs*). Для изменения формы лопаток необходимо в данных текстовых файлах изменить значения одного или нескольких геометрических параметров. В процессе оптимизации указанное изменение параметров выполняется оптимизатором *IOSO* на каждом шаге оптимизации, при «ручной» доводке – самим пользователем в любом тестовом редакторе, например, программе «*Блокнот*».



Источник: составлено автором

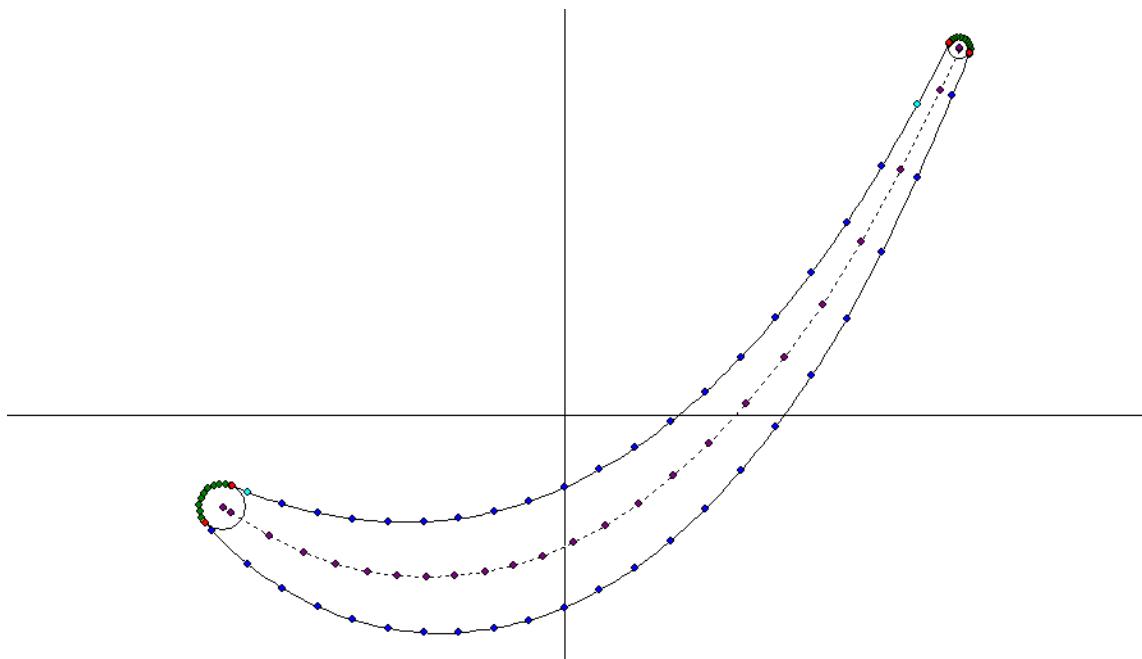
Рисунок А.2. Схема работы блока формирования геометрических моделей

В программном комплексе *Profiler* для параметризации геометрии лопаток и их перепрофилирования используется метод, основанный на деформации средней линии профилей. Краткий алгоритм перепрофилирования лопаток с использованием данного способа следующий.

1. По чертежам выполняется построение всех сечений лопатки;
2. В каждом сечении лопатки строится средняя линия (рисунок 1.4.3), как геометрическое место центров вписанных в профиль окружностей;
3. На средней линии выбирается 4 точки: в месте пересечения средней линии с контуром профиля на входе и выходе и две точки центральной части средней линии. Используя данные точки, рассчитывается и строится сплайн третьего порядка. Он аппроксимирует среднюю линию. Как правило, данный сплайн практически совпадает с геометрической средней линией сечения (рисунок 1.4.4);
4. Производится измерение расстояние от аппроксимирующего сплайна до поверхности спинки и корытца. Данная процедура выполняется путём вычисления расстояния от сплайна до корытца и спинки в направлении, перпендикулярном сплайну по всей его длине. В результате становится

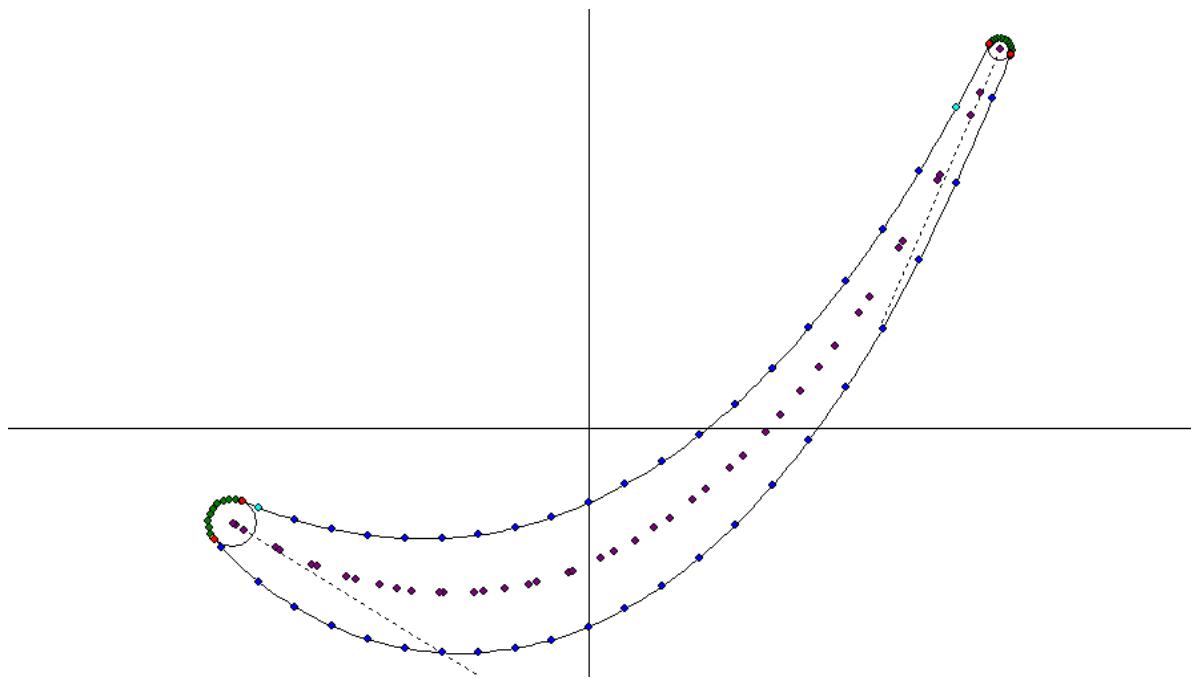
известна геометрия так называемого «несимметричного» профиля. Алгоритм параметризации на данном этапе предполагает, что его форма (несимметричного профиля) не меняется в процессе перестройки профиля.

5. Перепрофилирование выполняется за счёт изменения координат трёх из четырёх точек аппроксимирующего сплайна, что, естественно, приводит к перестроению самого сплайна.
6. На сплайн изменой формы «натягивается» замеренный в пункте 4 несимметричный профиль. Таким образом, получается новое перепрофилированное сечение лопатки турбины газогенератора.
7. При необходимости полученное сечение лопатки можно повернуть вокруг оси (изменить угол установки), сместить в направлении осей  $OX$  и  $OY$ , а также отмасштабировать.



*Источник: составлено автором*

Рисунок А.3. Средняя линия профиля



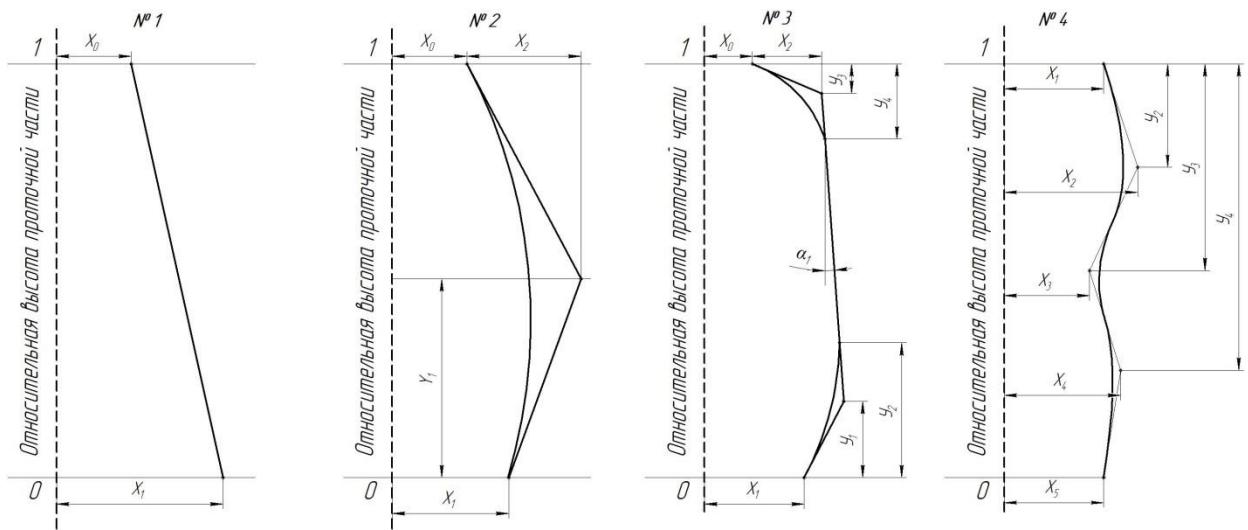
*Источник: составлено автором*

Рисунок А.4. Аппроксимирующий сплайн средней линия профиля

Как правило, форма пера лопатки турбины газогенератора описывается с помощью 7...10 сечений. Если вводить описанные выше параметры для каждого из сечений, то это приводит к тому, что число переменных параметрически описывающих форму лопатки будет чрезмерным, а также может привести к «рваной» геометрии лопатки: изломам профиля, резком изменении кривизны. По этой причине параметры, определяющие форму средней линии, вводятся в трёх сечениях: втулочном, среднем и периферийном. Для остальных сечений выполняется интерполяция параметров по квадратичному закону.

Программа *Profiler 3D* предназначена для автоматизированного внесения эффектов 3D–профилирования в параметрические модели лопаток, созданные в программе *Profiler*, путем изменения формы базовой линии лопатки (линия, которая проходит через начало координат каждого профиля лопатки), а также эффектов масштабирования хорды и толщины каждого профиля.

В программе *Profiler 3D* форма средней линии, а также масштабный коэффициент и коэффициент толщины лопаток параметрически меняется в зависимости от относительной высоты проточной части по нескольким законам (Рисунок А.5).



Источник: составлено автором

Рисунок А.5. Законы изменения базовой линии лопатки, реализованные в программе *Profiler 3D*

Внесение эффектов 3D профилирования в лопатку турбины газогенератора с помощью программы *Profiler 3D* осуществляется за счёт редактирования файла формата *rvs* создающегося в программе *Profiler* и содержащего информацию о форме каждого сечения лопатки в параметрическом виде.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОГО АНАЛИЗА И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ

В процессе эксплуатации авиационного двигателя свободная турбина должна обеспечивать беспрерывную генерацию мощности с максимальной эффективностью в условиях постоянного действия различных нагрузок: силовых, тепловых, вибрационных и других. Поэтому, в процессе проектирования или модернизации, к свободной турбине предъявляются такие требования как:

1. Максимально высокое значение КПД;
2. Достаточные запасы статической и динамической прочности;
3. Минимальная масса;
4. Надежность работы во всём диапазоне режимов в течении всего срока эксплуатации;
5. Ряд конструктивных требований (технологичность, ремонтопригодность и т.д.).

Поиск оптимального варианта свободной турбины затруднён по нескольким причинам. Во-первых, геометрия свободной турбины может описываться сотнями переменных, изменение каждой из которых может оказывать противоречивое влияния на её рабочий процесс. Во-вторых, необходим некий математический аппарат, позволяющий предсказать, с достаточной степенью точности, как повлияет изменение геометрии свободной турбины на параметры её работы. Также необходима выработка стратегии поиска оптимального варианта, выбор которой зависит от конструктивных особенностей свободной турбины. Очевидно, что решение поиска оптимального варианта свободной турбины длительная и трудоемкая задача, для решения которой целесообразно использовать средства автоматизации инженерных расчётов.

Цикл проектирования свободной турбины традиционно разделяют на этапы газодинамического и прочностного проектирования.

Целью газодинамического проектирования свободной турбины является поиск геометрии лопаток, обеспечивающих генерацию требуемой мощности с

максимальным значением КПД. При этом значения параметров, определяющих облик свободной турбины в составе двигателя, должны обеспечиваться с требуемыми допусками. Это такие параметры как степень расширения газа в турбине  $\pi_T^*$ , угол потока на выходе из турбины  $\alpha_{вых}$  град, расхода рабочего тела  $G$  и другие.

Целью прочностного проектирования рабочих колес свободных турбин является обеспечение статической и динамической прочности конструкции при минимально возможной массе с учетом конструктивно-технологических ограничений. Конструкция должна стablyно функционировать в течение заданного ресурса и условий эксплуатации. Прочностные требования включают обеспечение нормируемых запасов по кратковременной и длительной прочности, МЦУ, МинЦУ и несущей способности. При оптимизации рабочих колес необходимо учитывать требование к отстройке их частотного спектра от опасных резонансов.

В процессе поиска оптимального варианта свободной турбины меняется геометрия лопаток, что приводит не только к изменению протекания газодинамических процессов в ней, но также к изменению напряженно – прочностного состояния рабочих лопаток. Вариант свободной турбины, оптимальный с точки зрения газовой динамики, может не удовлетворять прочностным требованиям. И наоборот, вариант свободной турбины, удовлетворяющий прочностным требованиям, может не удовлетворять требованиям газовой динамики.

Исходя из вышеизложенного следует, что, в процессе проектирования и модернизации свободной турбины требуется обеспечить выполнение множества проектных требований и ограничений. Кроме того, количество переменных, описывающих геометрию турбины, может достигать сотни, а изменение каждой из них может оказаться противоречивое влияние на рабочий процесс и прочностное состояние свободной турбины. Эффективным средством, позволяющим решать задачу проектирования свободной турбины в таких условиях, является применение методов оптимизации, которые позволяют осуществлять поиск наилучшей конфигурации турбины в автоматическом режиме для заданных условий

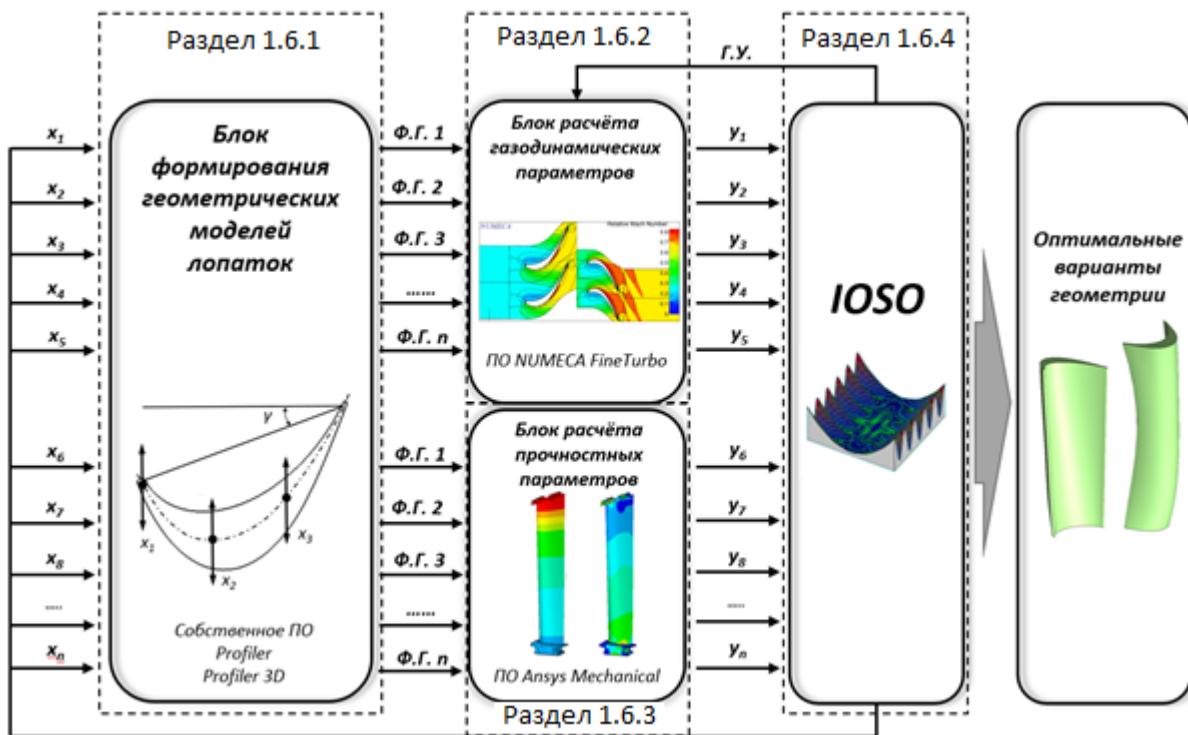
эксплуатации. В частности, таким средством является программа-оптимизатор *IOSO*.

Для решения задачи модернизации свободной турбины была разработана методологии многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации свободной турбины в автоматизированном режиме под управлением программы *IOSO*. Принципиальная схема разработанной методологии показана на рисунке 1.6.1.

Данная схема состоит из нескольких блоков.

На первом этапе программа-оптимизатор *IOSO* формирует вектор входных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Значения этих параметров в автоматическом режиме записываются в текстовые файлы, описывающие геометрию лопаток в параметрическом виде. Затем программы *Profiler* и *Profiler 3D* считывают созданные текстовые файлы и формируют файлы  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$  с геометрией лопаток в формате *geomturbo* пригодном для CAE-программных комплексов *NUMECA FineTurbo* и *Ansys*.

На втором этапе созданный набор файлов передается в блок расчёта газодинамических параметров и блок прочностного анализа. В блоке расчёта газодинамических параметров, созданные на предыдущем этапе файлы геометрии  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$ , загружаются в расчётную сеть, которая в дальнейшем, используется для расчёта газодинамических параметров работы турбины на требуемом режиме работы в программном комплексе *NUMECA FineTurbo*. Также в проект *NUMECA FineTurbo* загружается файл с граничными условиями, которые могут варьироваться в процессе оптимизации. После расчёта формируется файл, содержащий значения выходных параметров, таких как степень расширения газа в турбине  $\pi_T^*$ , угол потока на выходе из СТ  $\alpha_{\text{вых}}$ , расхода рабочего тела  $G$  и так далее.



Источник: составлено автором

Рисунок Б.1. Принципиальная схема разработанной методологии многодисциплинарного анализа и многокритериальной оптимизации свободной турбины

В блоке расчёта прочностных параметров, на основе файлов геометрии  $\Phi.G.1, \Phi.G.2, \Phi.G.3, \dots, \Phi.G.n$  создается КЭ сеть модифицированных лопаток рабочих колёс и осуществляется расчёт их прочностного состояния в программном комплексе *Ansys Mechanical*. После расчёта формируется текстовый файл, содержащий рассчитанные параметры прочностного состояния рабочих лопаток.

На основе тестовых файлов, содержащих значения рассчитанных параметров, газодинамической работы и прочностного состояния свободной турбины формируется вектор выходных параметров и ограничений  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ , который передается в *IOSO*, где осуществляется обработка результатов и выбираются оптимальные варианты турбины, а также формируется новый набор входных параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

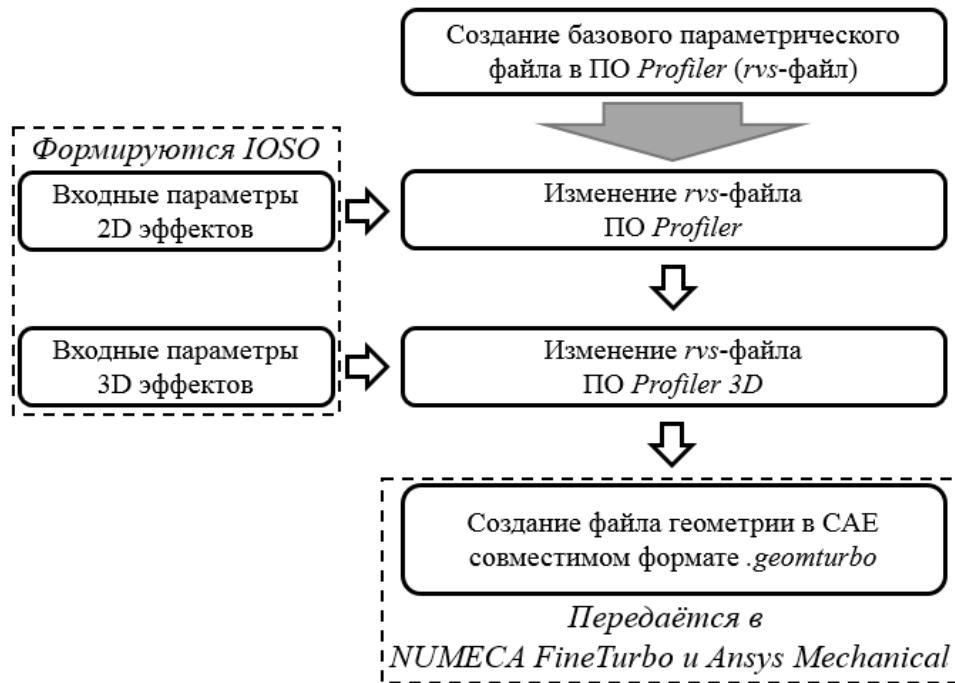
Данный процесс является итеративным и выполняется до тех пор, пока не достигнуты требуемые параметры турбины.

Детальное описание каждого из блоков приведено ниже.

## Блок формирования геометрических моделей лопаток свободной турбины

Блок формирования геометрических моделей лопаток свободной турбины (рисунок Б.2) предназначен для автоматизированного создания файлов, содержащих информацию о геометрии лопаток в формате *geomturbo*, совместимом с программными комплексами *NUMECA FineTurbo* и *Ansys Mechanical*.

Исходными данными для построения параметрических геометрических моделей лопаток являются её чертежи. В программе *Profiler* создаётся параметрическая геометрическая модель каждой лопатки свободной турбины (текстовые файлы формата *rvs*). Для изменения формы лопаток необходимо в данных текстовых файлах изменить значения одного или нескольких геометрических параметров. В процессе оптимизации указанное изменение параметров выполняется оптимизатором *IOSO* на каждом шаге оптимизации, при «ручной» доводке – самим пользователем в любом тестовом редакторе, например, программе «Блокнот».

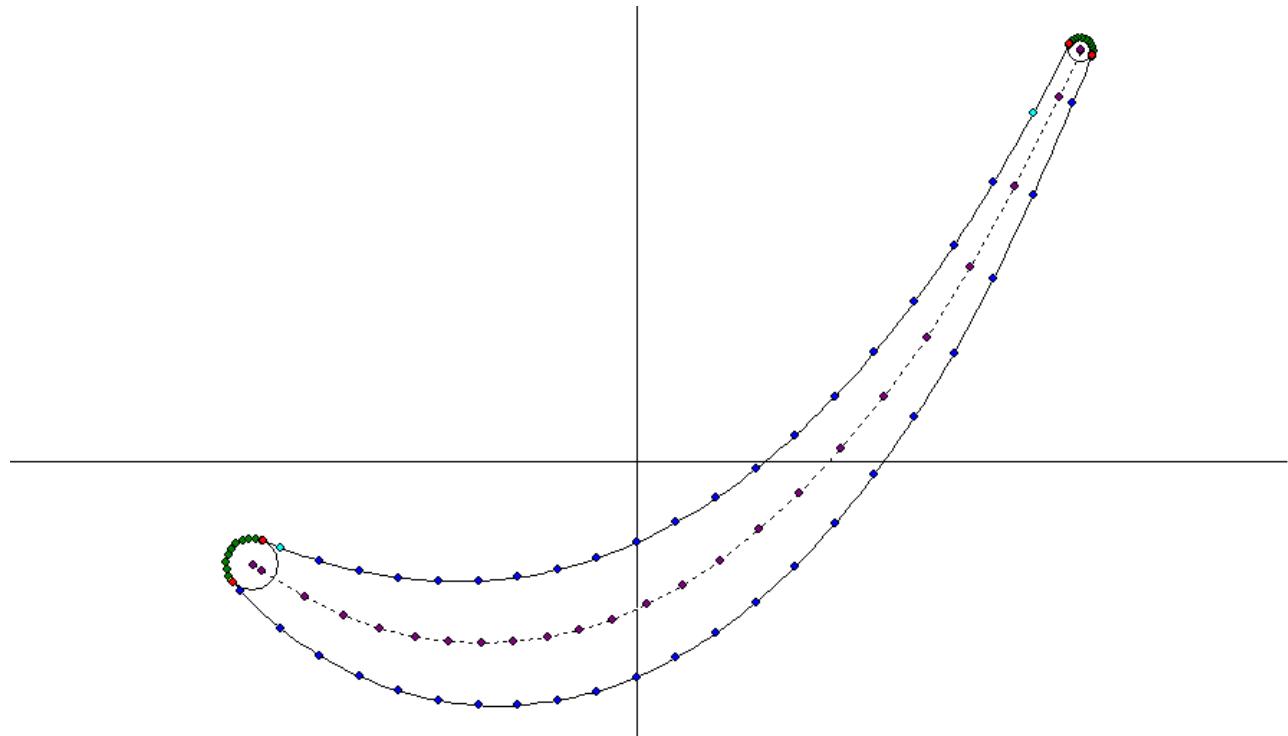


Источник: составлено автором

Рисунок Б.2. Схема работы блока формирования геометрических моделей

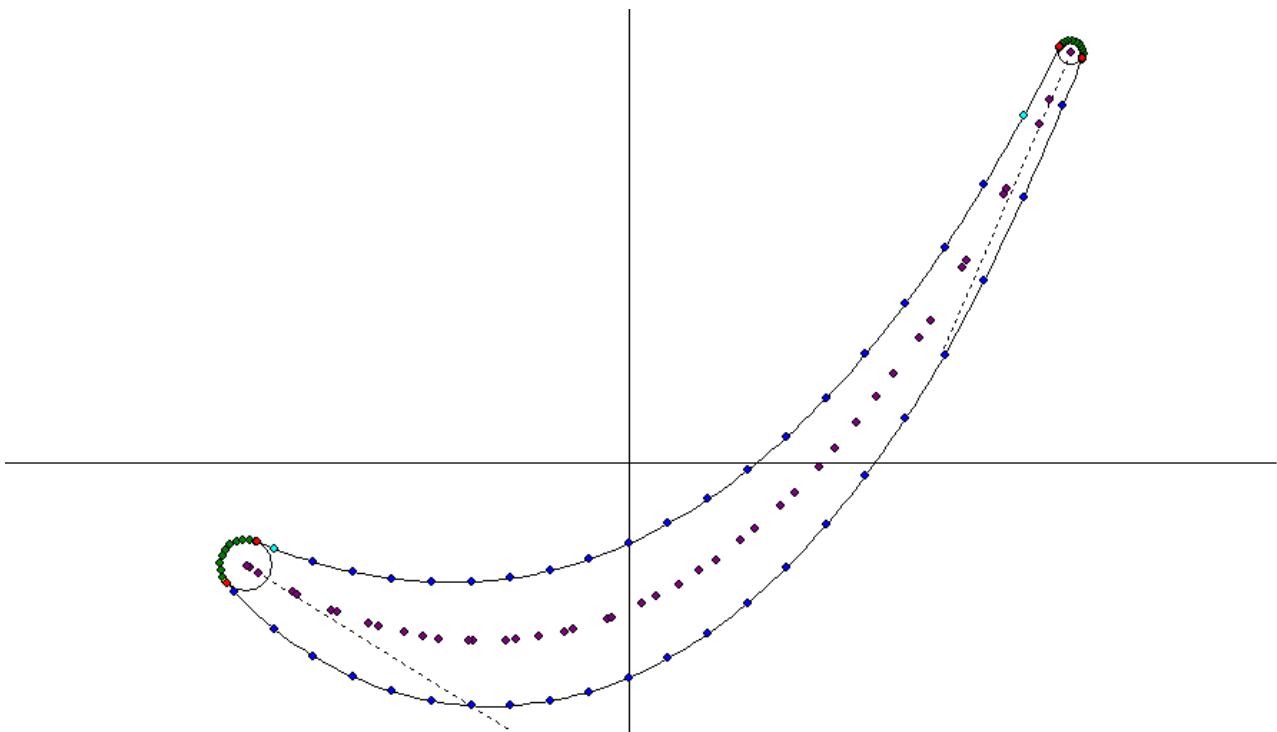
В программном комплексе *Profiler* для параметризации геометрии лопаток и их перепрофилирования используется метод, основанный на деформации средней линии профилей. Краткий алгоритм перепрофилирования лопаток с использованием данного способа следующий.

1. По чертежам выполняется построение всех сечений лопатки;
2. В каждом сечении лопатки строится средняя линия (рисунок Б.3), как геометрическое место центров вписанных в профиль окружностей;
3. На средней линии выбирается 4 точки: в месте пересечения средней линии с контуром профиля на входе и выходе и две точки центральной части средней линии. Используя данные точки, рассчитывается и строится сплайн третьего порядка. Он аппроксимирует среднюю линию. Как правило, данный сплайн практически совпадает с геометрической средней линией сечения (рисунок Б.3);



*Источник: составлено автором*

Рисунок Б.3. Средняя линия профиля



*Источник: составлено автором*

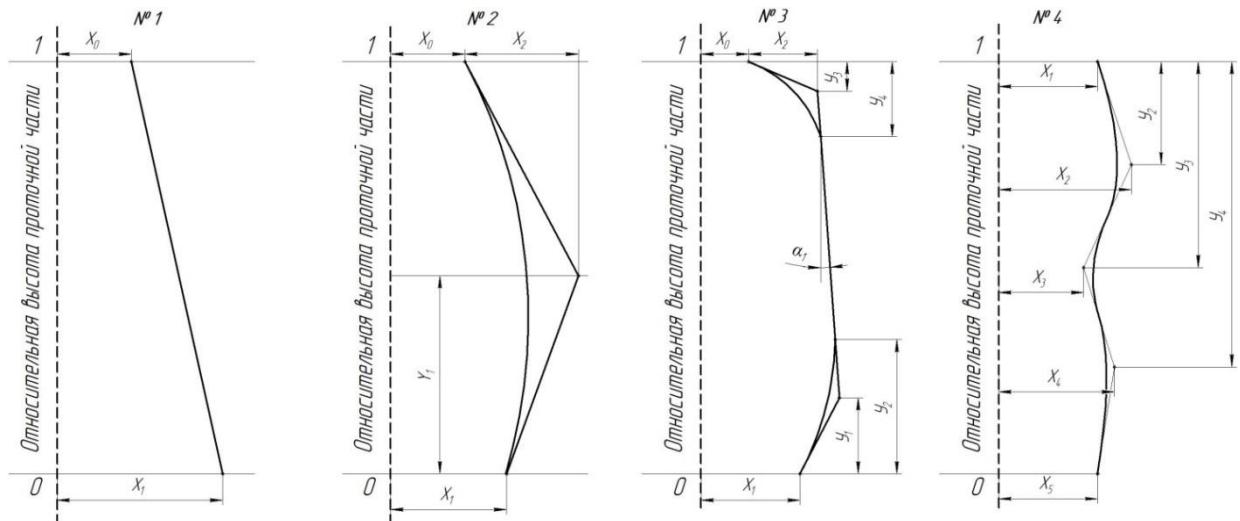
Рисунок Б.4. Аппроксимирующий сплайн средней линия профиля

4. Производится измерение расстояние от аппроксимирующего сплайна до поверхности спинки и корытца. Данная процедура выполняется путём вычисления расстояния от сплайна до корытца и спинки в направлении, перпендикулярном сплайну по всей его длине. В результате становится известна геометрия так называемого «несимметричного» профиля. Алгоритм параметризации на данном этапе предполагает, что его форма не меняется в процессе перестройки профиля.
5. Перепрофилирование выполняется за счёт изменения координат трёх из четырёх точек аппроксимирующего сплайна, что, естественно, приводит к перестроению самого сплайна.
6. На сплайн изменой формы «натягивается» замеренный в пункте 4 несимметричный профиль. Таким образом, получается новое перепрофилированное сечение лопатки турбины.
7. При необходимости полученное сечение лопатки можно повернуть вокруг оси (изменить угол установки), сместить в направлении осей  $OX$  и  $OY$ , а также масштабировать.

Как правило, форма пера лопатки турбин описывается с помощью 7...10 сечений. Если вводить описанные выше параметры для каждого из сечений, то это приводит к тому, что число переменных параметрически описывающих форму лопатки будет чрезмерным, а также может привести к «рваной» геометрии лопатки: изломам профиля, резком изменении кривизны.

Программа *Profiler 3D* предназначена для автоматического внесения эффектов 3D проектирования в параметрические модели лопаток, созданные в программе *Profiler*, путем изменения формы базовой линии лопатки (линия, которая проходит через начало координат каждого профиля лопатки), а также эффектов масштабирования хорды и толщины каждого профиля.

В программе *Profiler 3D* форма средней линии, а также масштабный коэффициент и коэффициент толщины лопаток параметрически меняется в зависимости от относительной высоты проточной части по нескольким законам (Рисунок Б.5).



Источник: составлено автором

Рисунок Б.5. Законы изменения базовой линии лопатки, реализованные в программе *Profiler 3D*

Внесение эффектов 3D проектирования в лопатку с помощью программы *Profiler 3D* осуществляется за счёт редактирования файла формата *rvs* создающегося в программе *Profiler* и содержащего информацию о форме каждого сечения лопатки в параметрическом виде.

Настройка программы *Proflier 3D* осуществляется путём создания входного файла, содержащего информацию о выбранном законе изменения базовой линии профиля, а также значения варьируемых параметров, необходимых для выбранного закона (Рисунок Б.5). Шаблон входного файла приведен ниже:

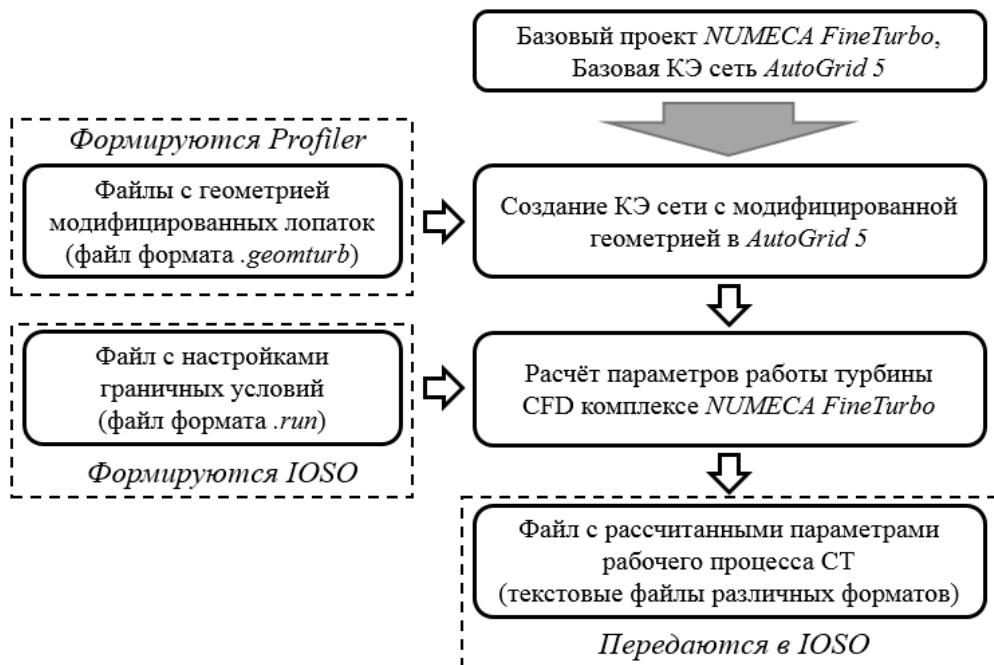
### **Блок расчёта газодинамических параметров свободной турбины**

Блок расчёта газодинамических параметров (Рисунок Б.6) предназначен для получения файла с параметрами работы текущего варианта свободной турбины на требуемом режиме работы.

Внутри блока расчёта газодинамических параметров осуществляется следующая последовательность действий:

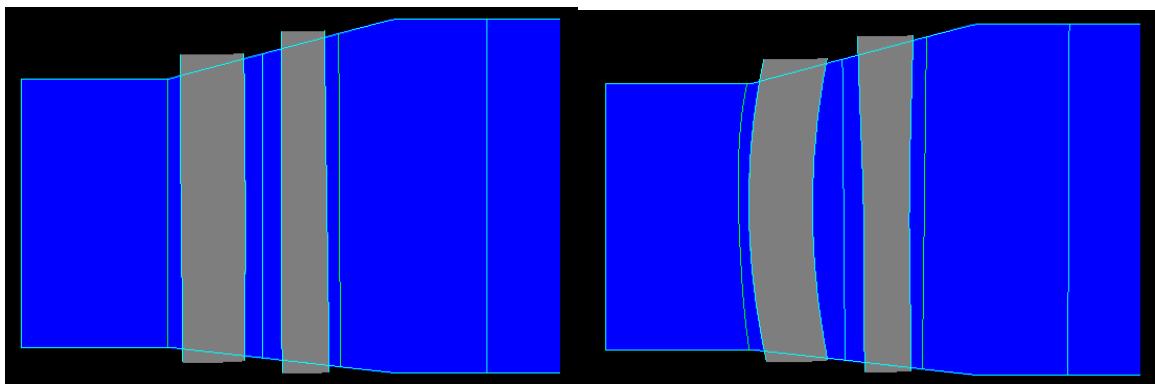
С помощью специализированных скриптов выполняется загрузка изменённых лопаток в базовую КЭ сеть *AutoGrid5*. Далее в программе *AutoGrid5* автоматически создаётся и сохраняется расчётная сетка.

Пример базовой и измененной геометрии свободной турбины (СТ), созданной на этапе расчёта газодинамических параметров и загруженный в программу *NUMECA AutoGrid 5* показан на рисунке Б.7



Источник: составлено автором

Рисунок Б.6. Схема работы блока расчёта газодинамических параметров



## Базовый вариант

## Изменённый вариант

*Источник: составлено автором*

Рисунок Б.7. Пример сравнение базовой и измененной геометрии свободной турбины в *NUMECAAutoGrid*

Созданная расчётная сетка загружается в программный комплекс *FineTurbo*, где выполняется расчёт численной модели с использованием расчётной сетки, построенной в программном комплексе *AutoGrid5*. В результате расчёта определяются интегральные параметры свободной турбины, которые сохраняются в текстовый файл формата *.mf*, который затем передаются в оптимизатор *IOSO*. При необходимости, также сохраняются поля распределения давлений и температур по поверхности лопаток. Данные поля могут передаваться передаются в программный комплекс *ANSYS Mechanical* для прочностных расчётов.

## Блок расчёта прочностных параметров свободной турбины

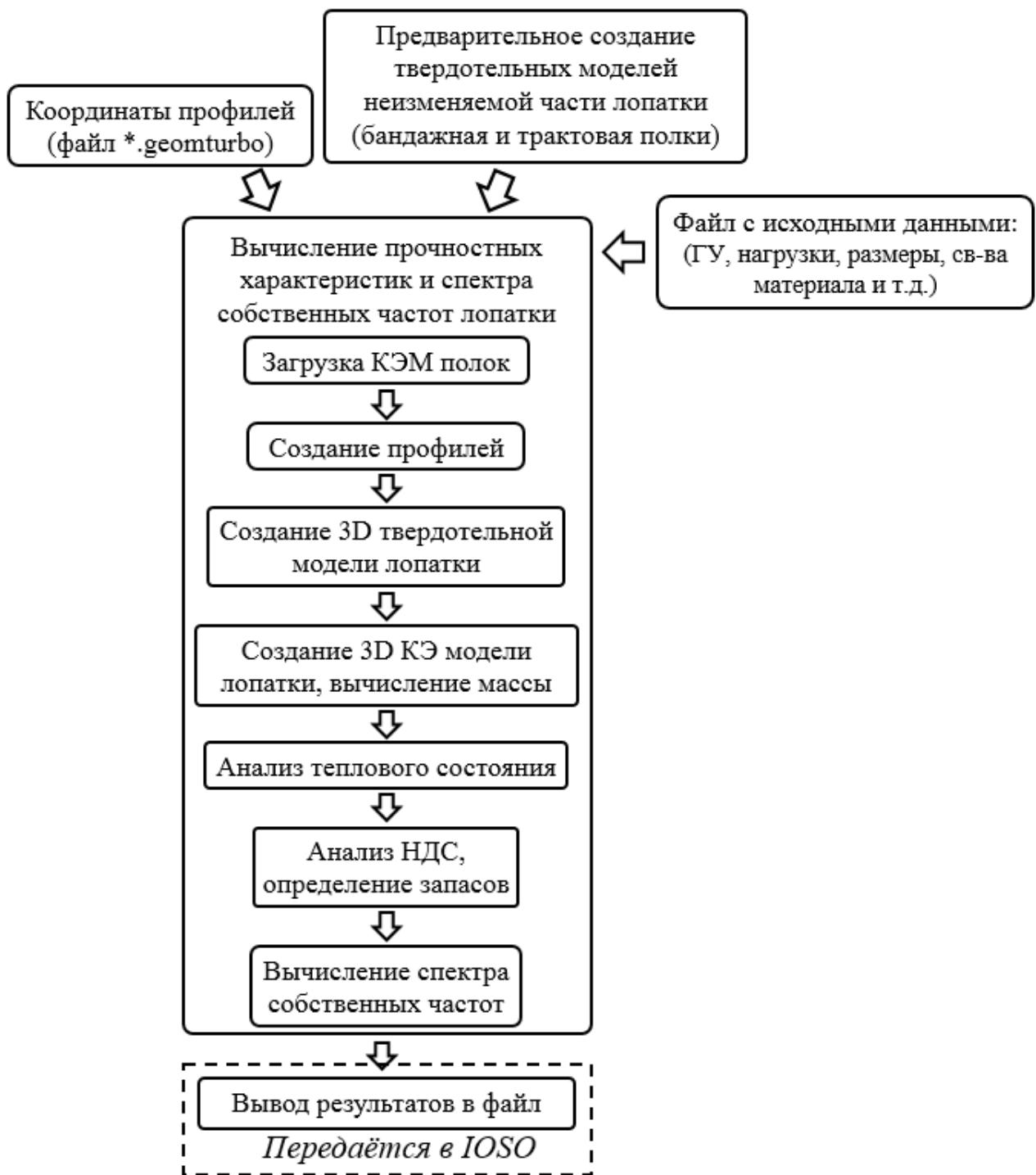
Блок расчёта прочностных параметров свободной турбины предназначен для оценки прочностных характеристик и спектра собственных частот оптимизируемой лопатки на каждой итерации оптимизации без участия конечного пользователя.

Общая схема работы блока приведена на рисунке Б.8. Процесс создания и анализа расчетных моделей состоит из нескольких этапов:

- 1) Загрузка твердотельных моделей неизменяемых элементов конструкции (бандажная и трактовая полки);
  - 2) Чтение файла с исходными данными;
  - 3) Чтение файла с координатами точек рабочих профилей

- 4) Создание сечений профилей по заданным координатам;
- 5) Создание твердотельной модели лопатки на базе полученных профилей;
- 6) Соединение неизменяемых (бандажная и трактовая полки) и изменяемых (перо лопатки) элементов лопатки;
- 7) Создание конечно-элементной модели лопатки;
- 8) Вычисление массы и центробежной силы лопатки;
- 9) Вычисление теплового состояния лопатки;
- 10) Приложение граничных условий и нагрузок;
- 11) Анализ НДС и местных запасов по длительной прочности лопатки на выбранных режимах;
- 12) Анализ спектра собственных частот, определение запасов по отстройке от опасных резонансов;
- 13) Формирование файла с выходными данными.

После завершения работы блока расчёта прочностных параметров в рабочей директории создаётся текстовый файл, содержащий рассчитанные значения параметров, характеризующих прочностное состояние рабочих колёс, который затем считывается программой *IOSO*.



Источник: составлено автором

Рисунок Б.8. Схема работы блока, отвечающего за анализ прочности