

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Шелехова Анна Сергеевна



**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НАУЧНОЙ КОНЦЕПЦИИ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ АЛЬТЕРНАТИВ
НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРОЕКТА**

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Денискин Юрий Иванович
доктор технических наук, профессор

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Выбор оптимальной научной концепции на начальном этапе проекта	10
1.1 Отечественные нормативные документы в области управления качеством проектов авиационной техники.....	12
1.2 Отечественная практика управления качеством проектов на концептуальной стадии.....	16
1.3 Зарубежные нормативные документы по анализу альтернатив на начальных этапах проектирования.....	21
1.4 Зарубежная практика выбора проектных решений.....	29
Выводы по главе 1.....	34
2 Элементы теории концептуального проектирования.....	36
2.1 Целеполагание.....	36
2.2 Объект и система	38
2.3 Понятия концепции и принципов, идеи и технологии	44
2.4 Неопределённости и риски	51
Выводы по главе 2.....	57
3 Разработка метода управления качеством научного проекта при формировании и анализе альтернатив.....	58
3.1 Факторный анализ	58
3.2 Полнофакторный эксперимент	62
3.3 Метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта.....	66
Выводы по главе 3.....	75
4 Практическая реализация метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта	76
4.1 Применение метода управления качеством научной концепции в проекте «летающего крыла» сверхбольшой пассажировместимости	76
4.2 Обоснование эффективных принципов интеграции для дальнего магистрального самолёта гражданской авиации	82

4.3 Анализ возможной концепции регионального транспортного самолёта ..	94
Выводы по главе 4.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
Список литературы	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Уровни готовности технологий	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
Акт внедрения результатов диссертационной работы в МАИ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
Акт внедрения результатов диссертационной работы в ЦАГИ.....	124

ВВЕДЕНИЕ

Система менеджмента качества продукции, включая стандарт SAE AS 9100, предусматривает сквозное интегрированное управление качеством на всех стадиях жизненного цикла изделий (ЖЦИ), в том числе авиастроения. Особый интерес представляет начальная концептуальная стадия ЖЦИ, когда принимаются наиболее общие, принципиальные решения, определяющие дальнейшую судьбу продолжительного проекта и эффективность будущего изделия. Сложный процесс концептуального проектирования (в данном случае авиационной техники) включает несколько этапов с различным содержанием деятельности проектной команды. Первый из них – «Анализ концепции» – полностью определяет идейное содержание информации о путях достижения цели проекта. Дальнейшие этапы раскрывают и уточняют эту информацию, и после экспериментального подтверждения она используется на следующей, демонстрационной стадии ЖЦИ.

Исследование, выполненное в данной работе, посвящено проблеме управления качеством концепции авиационного изделия, на этапе «Анализ концепции», на котором из множества возможных вариантов выбирается оптимальная концепция. Показателями качества концепции являются максимальная эффективность изделия и минимальный риск выбора неоптимальной концепции.

Актуальность темы исследования

Концептуальный проект является начальной стадией жизненного цикла создания нового объекта. Концептуальное проектирование будущего изделия начинается с анализа альтернатив и выбора наилучшей технической концепции. Сложность этой задачи требует создания научно-методического обеспечения, которое должно существенно снизить риск выбора неоптимальной концепции, т.к. в противном случае все усилия и затраты по осуществлению проекта будут напрасными, а качество результата – неудовлетворительным. Необходимость сравнения нескольких вариантов для выбора концепции проекта отражена в таких отечественных стандартах, как ГОСТ 2.118-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Техническое предложение и ГОСТ РВ 15.103-2004

«Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей. Основные положения». Аналогичные требования содержатся и в зарубежных документах, например, в международном стандарте SAE AS 9100 или методологии RIDM (Risk-Informed Decision Making) NASA, других стандартах по управлению проектами. Однако они не содержат никаких рекомендаций по необходимому числу вариантов и алгоритму их формирования, гарантирующему выбор оптимальной концепции. Таким образом, актуальным вопросом концептуального проектирования авиационной техники является метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив, который обеспечит построение достаточного перечня вариантов концепции, гарантировано содержащего наилучшее решение. Такой метод должен обеспечить выполнение требований к изделию каждой из рассмотренных концепций, т.к. любая из них может полностью определить содержание всего проекта.

Степень разработанности темы исследования

Тема диссертационной работы относится к области управления качеством продукции в приложении к задачам концептуального проектирования авиационной техники.

Первые исследования в области качества продукции выполнены такими учёными, как У. Шухарт, Э. Деминг, Дж. М. Джуран, К. Ишикава, Ж. Тагучи, С. Шинго, А. Фейгенбаум. Общая теория качества продукции сформирована в трудах известных отечественных учёных, таких как В. В. Бойцов, Б. В. Бойцов, Ю. В. Крянев, А. В. Гличев, В. Н. Азаров, О. П. Глудкин, В. А. Лapidус и др.

В развитие науки проектирования, где продукцией являются эффективные технические решения, а повышение качества обеспечивается методами оптимизации, большой вклад внесли учёные Л. М. Шкадов, В. Е. Денисов, В. В. Лазарев (ЦАГИ), О. К. Югов, О. Д. Селиванов (ЦИАМ).

За рубежом методы управления качеством научных исследований отражены в регламентах NASA и Министерства обороны США, посвящённых оценке рисков выполнения поставленных задач.

Разработанный в диссертационной работе метод основывается на применении факторного анализа и полнофакторного эксперимента для исключения рисков неправильного выбора технической концепции изделия и прямого поиска оптимального решения.

Среди трудов по факторному анализу можно выделить работы Я. Окунь, по планированию экспериментов – работы Ю. П. Адлера, Е. В. Марковой, Ю. В. Грановского, а также Е. А. Фокичевой, М. И. Алексеева и др. Отмеченные научные методы в приложении к аэродинамическим исследованиям нашли практическое применение в работах А. Ф. Чевагина и Н. А. Зленко при проведении численных и физических экспериментов в ЦАГИ.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта. Для достижения поставленной цели предусмотрено решение следующих **задач**:

1. Логико-математическая формализация основных понятий концептуального проектирования таких, как концепция, принцип, технология и других.
2. Анализ практических методов факторного анализа и планирования экспериментов в технических исследованиях.
3. Исследование основных неопределённостей и рисков управления качеством технической концепции.
4. Разработка метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта для минимизации риска выбора неоптимального решения.
5. Апробация разработанного метода на практических задачах концептуального проектирования авиационной техники.

Научная новизна исследования

В диссертации разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернативных вариантов изделия на начальной

стадии его жизненного цикла. Ранее этап «Анализ концепции» не выделялся для решения задачи поиска оптимального решения на основе строгой математической постановки. Действующие государственные и корпоративные стандарты по разработке конструкторской документации не содержат иных указаний для принятия решений, кроме указания на необходимость сравнения нескольких проектных вариантов.

Настоящая диссертация использует следующие новые подходы к решению этой задачи:

- предложено формализованное представление концепции как сочетания актуальных принципов действия, устройства и формы, направленных на достижение цели проекта;
- в рассмотрение включена расширенная модель взаимодействия объекта с внешней средой, включающая оценки полезного эффекта, потребных ресурсов и, кроме того, нагрузок, оказывающих влияние на форму объекта;
- для поиска оптимальной концепции впервые применены методы факторного анализа и планирования экспериментов, когда основными факторами являются принципы, а разработка каждого варианта концепции рассматривается как опыт в полнофакторном эксперименте;
- в качестве квалиметрической оценки качества результатов прямого поиска рассмотрена вероятность отыскания оптимальной концепции;
- согласно разработанному методу условием успешного управления качеством поиска является однозначное следование проектных решений включённым в концепцию сочетаниям принципов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке элементов теории концептуального проектирования и метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на основе математической модели, используемых на этапе выбора технической концепции, что позволило построить правило формирования альтернатив и снизить риски выбора неоптимальной научной концепции.

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенный метод позволяет проектантам (разработчикам авиационной техники) успешно решать задачу поиска оптимальной технической концепции при управлении качеством проектирования на начальной стадии жизненного цикла будущего изделия, в данном случае авиационной техники. Разработанные логико-математические модели этапа «Анализ концепции» являются основой для дальнейшей разработки теории концептуального проектирования. Полученные выводы и рекомендации вместе с результатами практического применения метода при выполнении концептуальных проектов позволили составить учебно-методический курс для учёных и специалистов авиационной отрасли.

Работы по теме диссертации проводились в ФГУП «ЦАГИ» в рамках НИР «Линия» и НИР «Магистраль-технологии» (по контрактам с Министерством промышленности и торговли РФ), НИР «Комплекс-проект» (по контракту с ФБГУ «НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»).

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» при реализации учебных программ дисциплин: «Менеджмент проектов», «Управление процессами», «Управление качеством в промышленности», «Информационные технологии в управлении качеством и защита информации» (Приложение Б) и ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского» для решения ряда задач концептуального проектирования перспективных летательных аппаратов (Приложение В).

Методология и методы исследования.

Метод управления качеством научной концепции в диссертации разрабатывается в рамках созданной в ЦАГИ теории концептуального проектирования, научный подход к которой сформирован в соответствии с логикой теории систем и теории множеств. Для поиска оптимальной концепции применены методы факторного анализа и планирования экспериментов, когда основными

факторами являются принципы, а разработка каждого варианта концепции рассматривается как опыт в полнофакторном эксперименте.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа стандартов, регламентирующих порядок выполнения проектов и требующих осуществление выбора рационального варианта изделия при отсутствии правила формирования возможных вариантов, гарантирующего успешный выбор.

2. Логико-математические модели концептуального проектирования, включающие формализованное представление концепции как сочетания актуальных принципов действия, устройства и формы, направленных на достижение цели проекта и определение понятия принципа как свертки информации о компонентах объектовой системы, направление которой задано единичным вектором-идеей.

3. Метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив, позволяющий минимизировать риск выбора неоптимальной технической концепции изделия на начальной стадии жизненного цикла проекта.

4. Применение метода к конкретным техническим исследованиям на этапе анализа концепции с переходом к следующему этапу концептуального проектирования без рисков выбора неоптимальной концепции.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения диссертации доложены на конференциях: Вторая научно-практическая конференция «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции – 2017» (Москва, 2017 г.), Третья научно-практическая конференция «Проблемы управления научными исследованиями и разработками – 2017» (Москва, 2017 г.), Четвёртая научно-практическая конференция «Проблемы управления научными исследованиями и разработками – 2018», YOUNG SCIENTISTS WORKSHOP 2017. Aeronautic Research in the 21st Century. Future Research Needs for the Technology. Change in Aeronautics (Жуковский, 2017 г.), XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва, 2019 г.).

1 Выбор оптимальной научной концепции на начальном этапе проекта

Система менеджмента качества продукции предусматривает сквозное интегрированное управление качеством на всех стадиях жизненного цикла изделий, в том числе авиационных.

Разработка научной концепции является начальной стадией жизненного цикла создания нового объекта (рис. 1), на которой принимаются наиболее общие, принципиальные решения, определяющие дальнейшую судьбу продолжительного проекта и эффективность будущего изделия. Сложный процесс концептуального проектирования включает несколько этапов с различным содержанием деятельности проектной команды. Он начинается с анализа альтернатив и выбора наилучшей технической концепции будущего изделия. Данный этап полностью определяет идейное содержание информации о путях достижения цели проекта. Дальнейшие этапы раскрывают и уточняют эту информацию, и после экспериментального подтверждения она используется на следующей, демонстрационной, стадии (рис. 1).

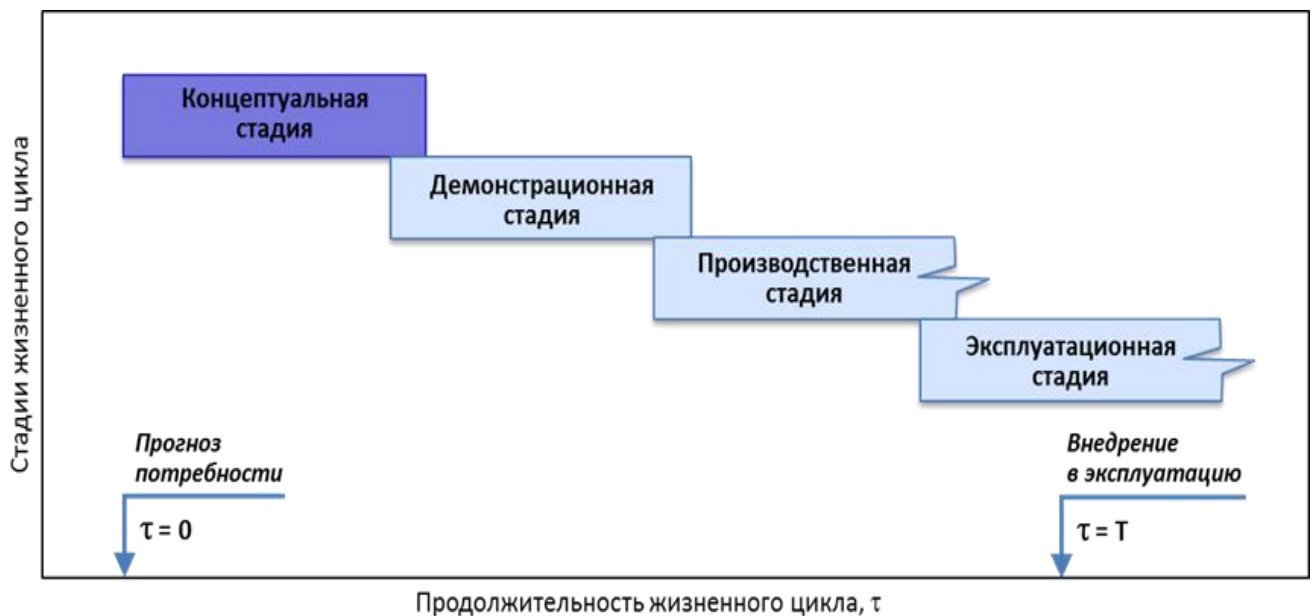


Рис. 1 – Жизненный цикл создания уникального объекта

В начальный момент исследования область поиска новой концепции безгранична и неопределённая, а вероятность отыскания правильного решения ничтожно мала. Любой проект, предложенный в этот момент, не может быть поддержан лицами, принимающими решение, если они не будут уверены в его эффективности и технической реализуемости.

Потребность в решении принципиально новых задач развития, например, создание экологически чистого самолёта, скоростного вертолёт или высотного беспилотного аппарата заставляет авиационную науку искать способы и средства их решения, ещё неизвестные на практике. В начальный момент исследования область поиска новой концепции безгранична и неопределённая, а вероятность отыскания правильного решения ничтожно мала. Любой проект, предложенный в этот момент, не может быть поддержан лицами, принимающими решение, если они не будут уверены в его эффективности и технической реализуемости.

В процессе концептуального проектирования каждому этапу проектирования присущи свои неопределённости и риски, связанные с уникальностью объекта. Для успешной разработки концептуального проекта необходимо их выявить, оценить и устранить. Анализ рисков предназначен не только для выбора концепции и разработки надёжных технологий, но и для выработки других мер по управлению проектом, которые позволят снизить вероятность возникновения негативной ситуации или минимизировать её последствия.

В диссертации рассматривается этап анализа альтернатив, на котором формируются различные комбинации из технологий, позволяющие определить ряд возможных концепций изделия в целом. Характеристики вариантов оцениваются и сравниваются, из них выбираются наиболее эффективные. В результате должна быть преодолена принципиальная неопределённость расчётной концепции, которая в дальнейшем станет предметом глубокого изучения. Для минимизации риска выбора неоптимальной концепции был разработан метод, основанный на планировании полнофакторного эксперимента и техническом проектировании испытываемых концепций в соответствии с комбинацией принципов, составляющих эти концепции.

Последовательное устранение неопределённостей в содержании концепции составляет одну из основных проблем концептуального проектирования. Сложность задачи выбора оптимальной научной концепции требует создания научных методов, которые должны существенно снизить риск выбора неоптимальной концепции, т.к. в противном случае все усилия и затраты по осуществлению проекта будут напрасными, а качество результата – неудовлетворительным.

Таким образом, актуальным вопросом управления качеством концептуального проектирования авиационной техники является метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив, который обеспечит построение достаточного перечня вариантов концепции, гарантированно содержащего наилучшее решение. Такой метод должен обеспечить требуемое качество каждой из рассмотренных концепций, использующих инновационные технологии, т.к. любая из них может полностью определить содержание всего проекта.

Любая реальная деятельность в области управления проектами должна быть осмысленной и безошибочной, так как предполагает коллективную организацию работ и ответственность руководства за успех предприятия. Организация научных проектов является специфической деятельностью и, как любая профессиональная работа, должна подчиняться универсальным правилам научной организации труда.

Далее будут проанализированы отечественные и зарубежные нормативные документы в области управления качеством проектов авиационной техники, а также существующие практики выбора технических решений.

1.1 Отечественные нормативные документы в области управления качеством проектов авиационной техники

Анализ показал, что в настоящее время в России не существует нормативных документов, регламентирующих управление именно научными проектами. Однако можно выделить два блока документов, применение которых возможно для управления качеством при проектировании изделий авиационной техники:

- документы по управлению проектами,
- документы по управлению качеством.

В России деятельность по проектному управлению регламентирована следующими стандартами:

- 1) ГОСТ Р 54869-2011 «Требования к управлению проектом»;
- 2) ГОСТ Р 54870-2011 «Требования к управлению портфелем проектов»;
- 3) ГОСТ Р 54871-2011 «Требования к управлению программой»;
- 4) ГОСТ Р ИСО 21500-2014 «Руководство по проектному менеджменту».

Из всех отечественных стандартов, посвящённых управлению проектами, наиболее полным руководством, устанавливающим нормы для терминов и определений, основных понятий проектного менеджмента и процессов управления проектами, является ГОСТ Р ИСО 21500-2014 «Руководство по проектному менеджменту». По своему назначению этот стандарт аналогичен Руководству РМВОК [102], хорошо известному пособию, которое, однако, не имеет в России статуса нормативно-правового документа.

Необходимо отметить, что стандарты управления проектами содержат общие рекомендации организационного характера для всех видов экономической деятельности (строительство, производство, финансовая деятельность и т.д., включая научные разработки), однако в содержательной части научные проекты имеют существенные отличия.

Серия государственных стандартов по управлению качеством обширна и содержит как общие документы по управлению качеством, так и документы с узким применением.

Для проектов авиационной техники наиболее релевантным является ГОСТ Р 58876-2020. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования.

Смежным для областей управления проектами и управления качеством является ГОСТ Р ИСО 10006-2019 Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах.

Сравнительный анализ наиболее подходящих предмету исследования ГОСТов приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ стандартов по предмету исследования

	ГОСТ Р 58876-2020 Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования	ГОСТ Р ИСО 10006-2019 Менеджмент качества. Руководящие указания по менеджменту качества в проектах	ГОСТ Р ИСО 21500-2014 Руководство по проектному менеджменту
Область применения	Для авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Для применения организациями независимо от их вида, размера, поставляемой продукции и предоставляемых услуг	Для организаций, работающих над проектами различной сложности, малыми или крупными, кратко- или долгосрочными, индивидуальными проектами или проектами в рамках программы или портфеля проектов, в различных средах и независимо от задействованного вида продукции и услуг или процесса	Проекты любых видов для организаций любого вида
Описание жизненного цикла изделия	При определении этапов и средств управления проектированием и разработкой организация должна рассматривать: а) характер, продолжительность и сложность работ по проектированию и разработке; б) требуемые стадии процесса, включая проведение применимых анализов проектирования и разработки.	Этапы проекта делят жизненный цикл проекта на управляемые наборы действий, такие как создание концепции, разработка, реализация и завершение	Проекты, как правило, подразделяют на фазы, состав и содержание которых определяется потребностями управления и контроля. Для эффективного проектного менеджмента на протяжении всего его жизненного цикла, а рамках каждой фазы следует выполнить определённый набор действий. Границами фаз ЖЦ проекта обычно являются точки принятия решений
Требования к анализу альтернатив	Нет	Нет	Нет

Помимо рассмотренных стандартов по управлению проектами и управлению качеством существуют отдельные узкоспециализированные стандарты, такие как

ГОСТ 2.118-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Техническое предложение и ГОСТ РВ 15.103 - 2004 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей. В этих стандартах зафиксирована необходимость сравнения нескольких вариантов изделия на этапе выбора технической концепции. Аналогичные требования содержатся в ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. Сравнение данных стандартов приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ узкоспециализированных стандартов по предмету исследования

ГОСТ 2.118-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Техническое предложение	ГОСТ РВ 15.103-2004 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей	ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем
В общем случае при разработке технического предложения проводят следующие работы: а) выявление вариантов возможных решений , установление особенностей вариантов (принципов действия, размещение функциональных составных частей и т.п.), их конструкторскую проработку. Глубина такой проработки должна быть достаточной для сравнительной оценки рассматриваемых вариантов; б) проверку вариантов на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформление заявок на изобретение; в) сравнительную оценку рассматриваемых вариантов...	В ходе выполнения аванпроекта (СЧ аванпроекта) в общем случае предусматривают следующие работы и мероприятия [объем и содержание выполняемых работ и мероприятий конкретизируются в ТТЗ (ТЗ) с учетом специфики разрабатываемого изделия ВТ и требований нормативно-технических документов системы общих технических требований МО РФ, распространяющихся на изделие ВТ]: 1) тактико-техническое обоснование целесообразности создания изделия ВТ с проработкой вопросов его боевого применения и определением места изделия ВТ в системе вооружения, определение возможности улучшения заданных характеристик изделия ВТ и последующего повышения его технического уровня и	Цель процесса принятия решений заключается в выборе из существующих альтернатив наиболее предпочтительного направления проектных действий. Этот процесс является реакцией на возникающие в процессе жизненного цикла системы запросы о принятии решений, направленных на достижение заданных, желаемых или оптимальных результатов вне зависимости от характера или источников таких запросов. Альтернативные действия анализируются и выбирается направление действий.

<p>г) выбор оптимального варианта (вариантов) изделия, обоснование выбора; установление требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.) и к последующей стадии разработки изделия (необходимые работы, варианты возможных решений, которые следует рассмотреть на последующей стадии и др.)»</p>	<p>эффективности путём модернизации; 2) определение технической возможности и путей создания изделия ВТ, рассмотрение возможностей технических и технологических решений; 3) проработка возможных вариантов создания изделия ВТ, составление технического описания и разработка предложений по схеме деления изделия ВТ на составные части, выявление особенностей функционирования и эксплуатации; обоснование основных технических решений и принципов функционирования, проработка предварительных энергетических, массовых и габаритных характеристик; 4) обоснование выбора окончательного варианта и состава изделия...</p>	<p>Решения и их обоснование документируются для поддержки принятия решений в будущем</p>
---	---	--

Сравнительный анализ показал, что в рассмотренных стандартах не определено правило формирования альтернатив, которое позволило бы снизить риски выбора неоптимальной научной концепции.

1.2 Отечественная практика управления качеством проектов на концептуальной стадии

В целях управления качеством проектов авиационной техники в настоящее время в отечественной практике существуют различные подходы к организации жизненного цикла проектов на концептуальной стадии, к ним можно отнести:

- конструкторская разработка (Корпоративный стандарт ОАО «ОАК» «Порядок управления авиационными программами»),
- аудит научных проектов на основе уровней готовности технологий (ГОСТ Р 57194.1-2016 «Трансфер технологий», аналог NASA – TRL),

– разработка технической концепции (концептуальное проектирование ЦАГИ).

Проанализируем каждый из этих подходов.

Порядок управления промышленными проектами/программами описан в корпоративном стандарте ОАО «ОАК» «Порядок управления авиационными программами» [70], который устанавливает связь между проектно-конструкторской деятельностью и программами управления ею (рис. 2). Следует отметить, что указанный стандарт заимствован из многолетней практики работы зарубежных фирм, а именно, Boeing и Airbus. Выбор концепции в соответствии с данным стандартом осуществляется на самом первом этапе, приведём его описание.

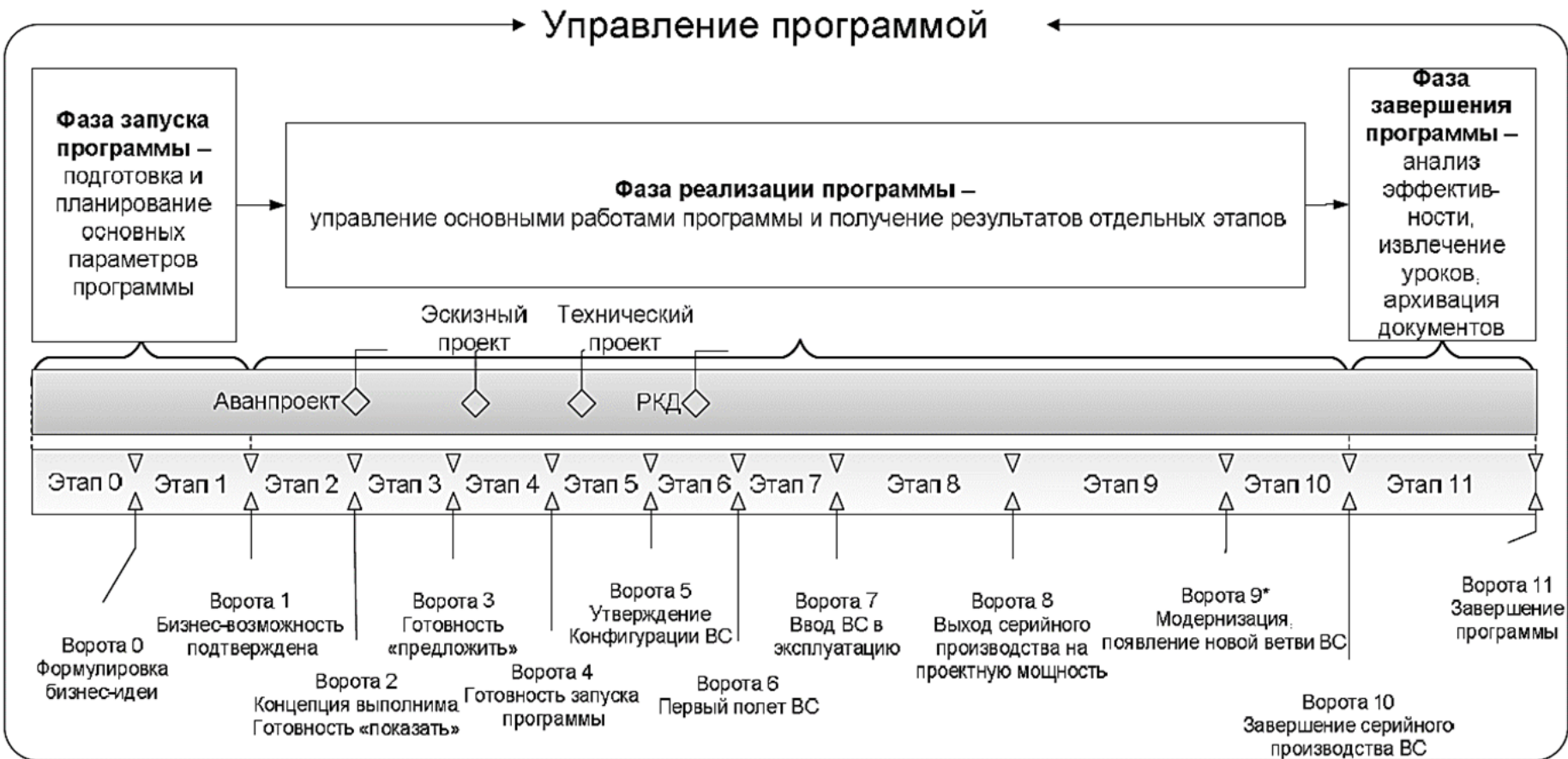
Этап 0: Предварительный анализ («Ворота 0: Формулировка бизнес-идеи»).

Осуществляется выделенным сотрудником Координационного органа с привлечением сотрудников релевантных Дирекций в соответствии с внутрикорпоративными процедурами.

Задачи этапа:

- сформулировать бизнес-идею и убедиться в целесообразности запуска новой программы и её инвестиционной привлекательности;
- сформировать концепцию нового воздушного судна;
- определить, является ли предложенная концепция новой программой;
- провести предварительный анализ рыночной привлекательности и экономической эффективности концепции;
- принять решение об углублённых детальных исследованиях, требующих инвестиций [70].

Как видно, выбор концепции в данном подходе осуществляется без формирования нескольких альтернативных вариантов, он основан на одной идее и технологиях, которые доступны на момент принятия решения.



* «Ворота 9» не обязательны к прохождению, если не возникло рыночной или технологической потребности в существенном изменении воздушного судна

Рис. 2 – Управление программой (ОАК) [70]

Система уровней готовности технологий (УГТ) заимствована из зарубежной практики и представляет собой систему показателей, определяющих уровни зрелости технологий на различных этапах их разработки. В России она зафиксирована в ГОСТ Р 57194.1-2016 Трансфер технологий. Общие положения. Уровни УГТ приведены в Приложении А. Данная система может быть использована для аудита проектов авиационной техники, но не как алгоритм для разработки проекта, в т. ч. научной концепции.

Методология концептуального проектирования [66], разработанная в ЦАГИ, состоит в последовательном уменьшении неопределённостей выбора критических элементов и оценки ключевых характеристик объекта, уменьшении рисков их возможной реализации в техническом изделии (рис. 3).

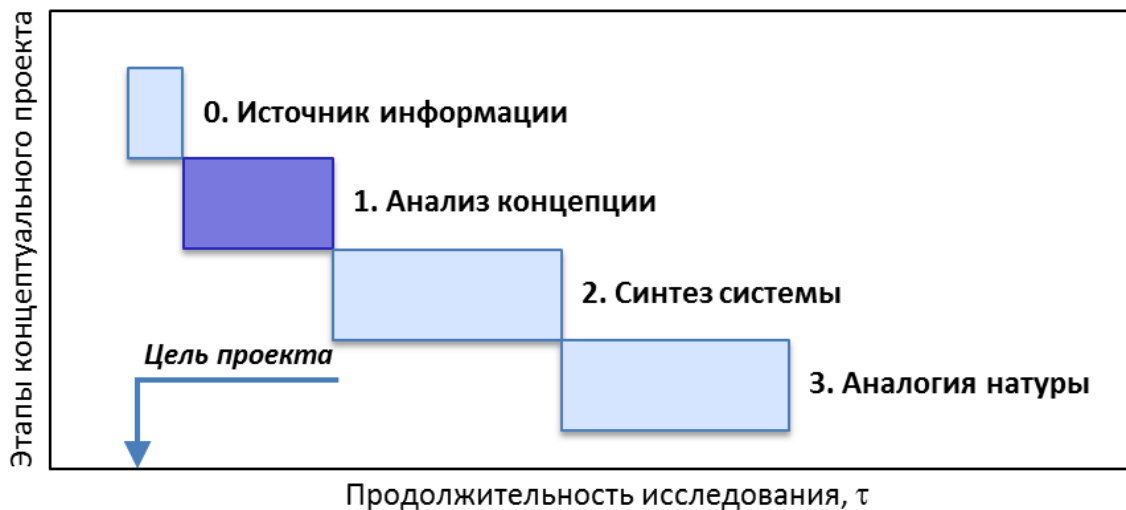


Рис. 3 – Этапы концептуального проектирования

Данная методология предусматривает необходимость выполнения несколько обязательных этапов концептуального исследования. При этом каждый следующий этап осуществим при условии, что нужная для его начала информация получена на предыдущем этапе и достигнут соответствующий уровень готовности технологий [66].

На Этапе 0 предлагается множество способов и устройств, которые могут быть полезны для решения новой задачи на практике. Этот «мозговой штурм»

сопровождается оценкой чувствительности характеристик систем будущего самолёта к разнообразным технологиям, чтобы отказаться от бесполезных.

На Этапе 1 (на рис. 3 выделен темным цветом) рассматриваются различные комбинации из предложенных технологий, которые позволяют сформировать ряд возможных концепций изделия в целом. Характеристики вариантов оцениваются и сравниваются, из них выбираются наиболее эффективные для детального рассмотрения.

На Этапе 2 элементы концепции согласуются между собой так, чтобы максимизировать её эффективность. Выявляются критические технологии, положенные в основу выбранной концепции, оказывающие на неё определяющее влияние или недостаточно изученные. Таким образом, формируются направления специальных исследований, от которых зависит доказательство технической реализуемости изделия в целом.

Этап 3 посвящается экспериментальным исследованиям критических технологий (физическим, стендовым, натурным), которые дают первые доказательства их технической реализуемости, наличия эксплуатационных преимуществ и позволяют предварительно установить соответствие требованиям к изделию. Создаются условия для перехода к демонстрационной стадии проекта.

В процессе концептуального проектирования каждому этапу присущи свои неопределённости и риски, связанные с уникальностью объекта. Для успешной разработки концептуального проекта необходимо их выявить, оценить и устранить. Анализ рисков предназначен не только для выбора концепции и разработки надёжных технологий, но и для выработки других мер по управлению проектом, которые позволят снизить вероятность возникновения негативной ситуации или минимизировать её последствия.

Выбор концепции в данном подходе осуществляется на этапе 1, для чего в настоящей диссертации был разработан соответствующий метод.

Следует отметить, что в отечественной практике советского времени «предварительное» (дотехническое) проектирование в авиастроении было организовано ещё в 1960-х годах в ЦАГИ (В. М. Мясичев, Л. М. Шкадов) в силу

задач, поставленных перед «объектовыми» научными коллективами, деятельность которых была посвящена исследованию перспектив развития отдельных видов авиации. Развитие научного потенциала этих коллективов привело к разработке ряда известных проектов, оказавших влияние на деятельность авиапромышленности, в т. ч.:

- концепция малозаметного дозвукового самолёта, разработка которой в 1986г. привела к решению Президиума НТС МАП о пересмотре проекта Ту-202;
- концепции транспортных самолётов Ту-330 и Ту-230 (1993-1995 годы) на основе 75%-й унификации с пассажирскими Ту-204 и Ту-334. (Ту-230 является прообразом известного сегодня проекта Ил-276);
- международный проект самолёта типа «летающее крыло» сверхбольшой пассажировместимости (1997-2001 годы), поддержанный фирмами Boeing и Airbus, которые по его результатам организовали у себя аналогичные разработки;
- интегральная концепция перспективного дальнего магистрального самолёта с существенно уменьшенным расходом топлива и уровнем шума на местности;
- концепция перспективного регионального транспортного самолёта (с 2016 г. по н. в.).

1.3 Зарубежные нормативные документы по анализу альтернатив на начальных этапах проектирования

Зарубежные подходы к проектированию также предполагают разработку альтернативных решений при реализации проектов. Наиболее полно данные процессы описаны в нормативных документах NASA и Министерства обороны США.

В NASA особой частью методологии проектного управления является система принятия решений Risk-Informed Decision Making (RIDM). На основе

данной методики разработана и введена в действие Инструкция NPR 8000.4A, обязательная для исполнения всеми специалистами, занимающимися выявлением, анализом и управлением рисками, а также руководителями программ/проектов и инженерным составом конструкторских бюро.

Положения, изложенные в RIDM, являются составной частью процесса проектирования, т.к. позволяют правильно и всесторонне проводить анализ присущих проекту рисков, от чего зависят управленческие решения, напрямую влияющие на достижение целей и задач проекта/программы, включая обеспечение безопасности, получение требуемых технических характеристик, стоимостных и временных параметров [58].

Методика принятия решений RIDM дополняет правила непрерывного управления рисками CRM (Continuous Risk Management), предлагая алгоритм принятия важных и/или директивных решений в первую очередь в ходе процесса выбора альтернатив на начальных этапах разработки проекта/программы.

RIDM включает три этапа (рис. 4).

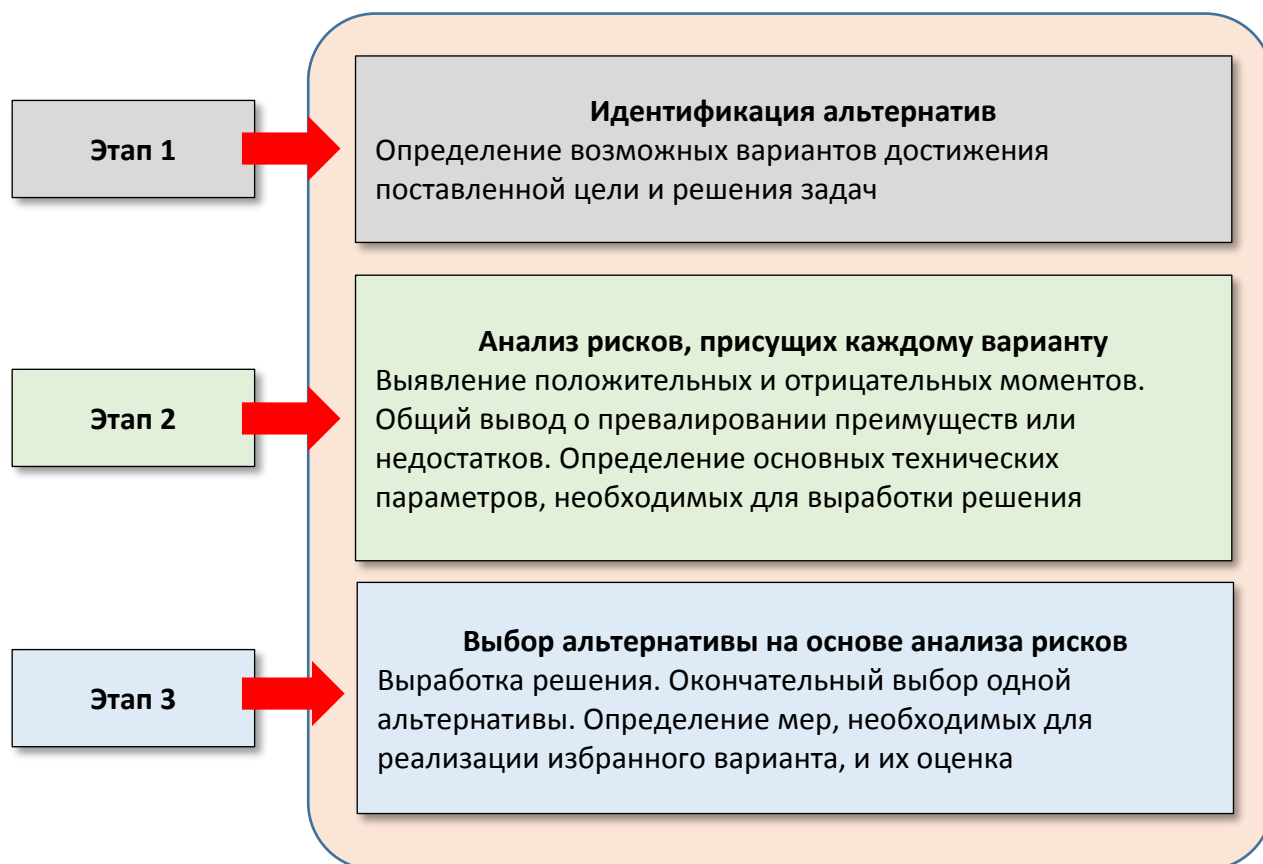


Рис. 4 – Этапы RIDM

Это деление весьма условно, т.к. идентификация и анализ рисков могут осуществляться параллельно по каждой группе, и только окончательный выбор одного варианта проводится на основе выводов, сделанных по окончании этой работы.

Задача 1 этапа – составить перечень вариантов концепции (конфигураций), каждый из которых позволяет выполнить главные задачи проекта. Этап делится на две фазы: 1. Уяснение требований заинтересованных участников проекта/программы; 2. Подбор допустимых альтернатив.

Содержание этапа 1 представлено на рис. 5.



Рис. 5 – Этап 1. Процесс идентификации альтернатив [58]

Отправная точка данного этапа – составление списка всех возможных конфигураций. Специалисты NASA рекомендуют включать в список все возможные концепции, вплоть до эмпирических, никогда не реализованных на практике. Считается, что большинство прорывных технологий и инноваций появились в результате попыток реализовать концепции, казавшиеся на тот момент невозможными. В подборе допустимых альтернатив необходимо участие специалистов, обладающих знаниями о существующих и разрабатываемых технологиях.

Затем составленный список обсуждается на всех уровнях, в том числе заинтересованными участниками проекта, сокращается/дополняется, в результате формируется окончательный список допустимых альтернатив.

Для анализа допустимые альтернативы структурируются с помощью так называемого «производственного дерева» (trade tree): раскладываются на отдельные элементы и различные варианты решения задачи (см. пример на рис. 6).

На основании производственного дерева определяются предпочтительные альтернативы (перспективные концепции). Для окончательного выбора альтернативы требуется провести полную оценку и сравнительный анализ только оставшихся вариантов (конфигураций).

Задача второго этапа – выявить все неопределённости и риски, представить их в количественном эквиваленте. Его суть состоит в том, чтобы оценить имеющиеся возможности (технические, технологические, финансовые и т.п.) в сочетании с вероятностным моделированием.

Этап делится на две фазы: 1. Определение структуры и методики оценки рисков; 2. Проведение анализа рисков и документирование результатов.

Содержание этапа 2 представлено на рис. 7.

Фактически для каждого этапа реализации проекта существуют свои методы анализа и оценки рисков. Задача аналитиков – подобрать или скомпилировать из различных методов такую методику, которая позволила бы осуществить многопрофильный анализ всех рисков, присущих каждой рассматриваемой альтернативе (концепции).

В настоящее время существует большой перечень методик анализа и оценки рисков. Для выбора методик RIDM рекомендует использовать дифференцированный подход. Аналитiku необходимо определить требуемый уровень детализации, который может ему позволить провести достоверную оценку всех компонентов (критических технологий) и дать рекомендации по выбору определённой альтернативы (концепции).

Анализ рисков предназначен не столько для выбора концепции с наименьшим количеством рисков, сколько для выработки в дальнейшем мер по управлению ими, т.е. для разработки плана мероприятий, реализация которых позволит снизить вероятность возникновения негативной ситуации или минимизировать её последствия.

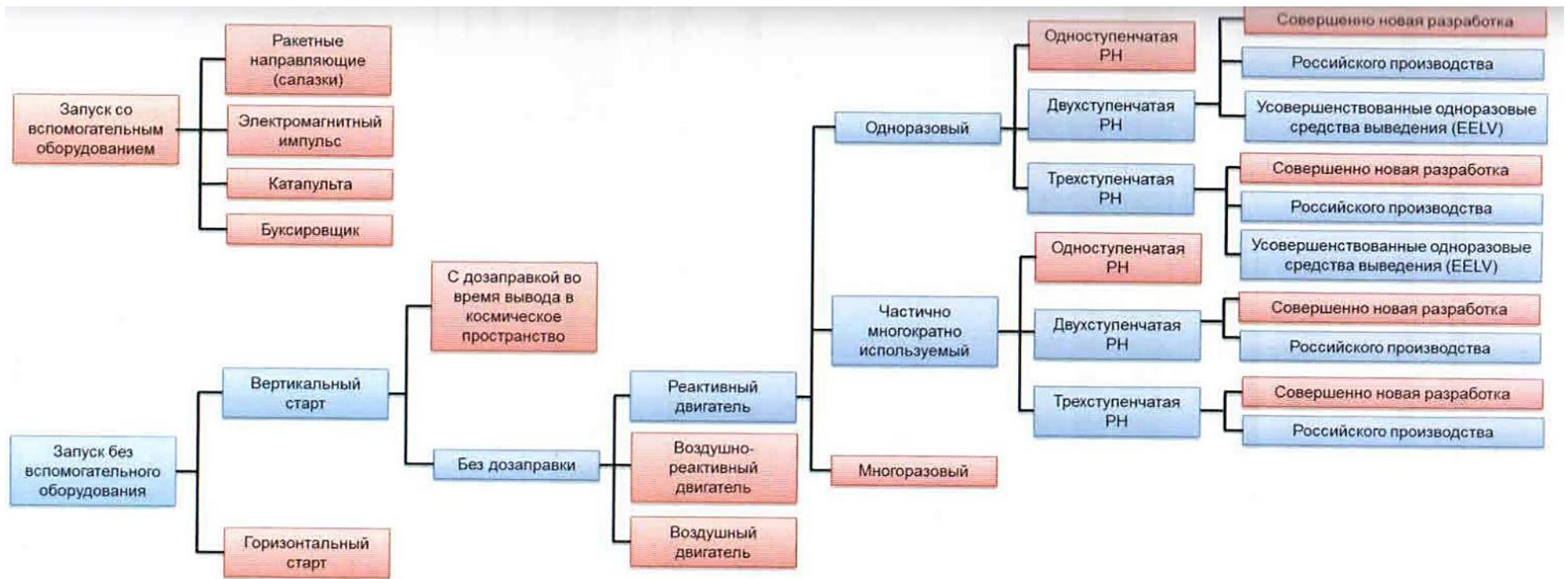


Рис. 6 – Пример производственного дерева при выборе ракеты-носителя (синий – приемлемые альтернативы, красный – отвергнутые) [58]



Рис. 7 – Процесс анализа рисков [58]

Для окончательного выбора альтернативы *на этапе 3* необходимо провести их сравнительный анализ, в том числе по результатам оценки рисков.

Этап 3 делится на две фазы: 1. Оценка исполнительных мер на основе единых показателей рисков; 2. Выбор альтернативы, разработка отчётной документации.

Содержание этапа 3 представлено на рис. 8.

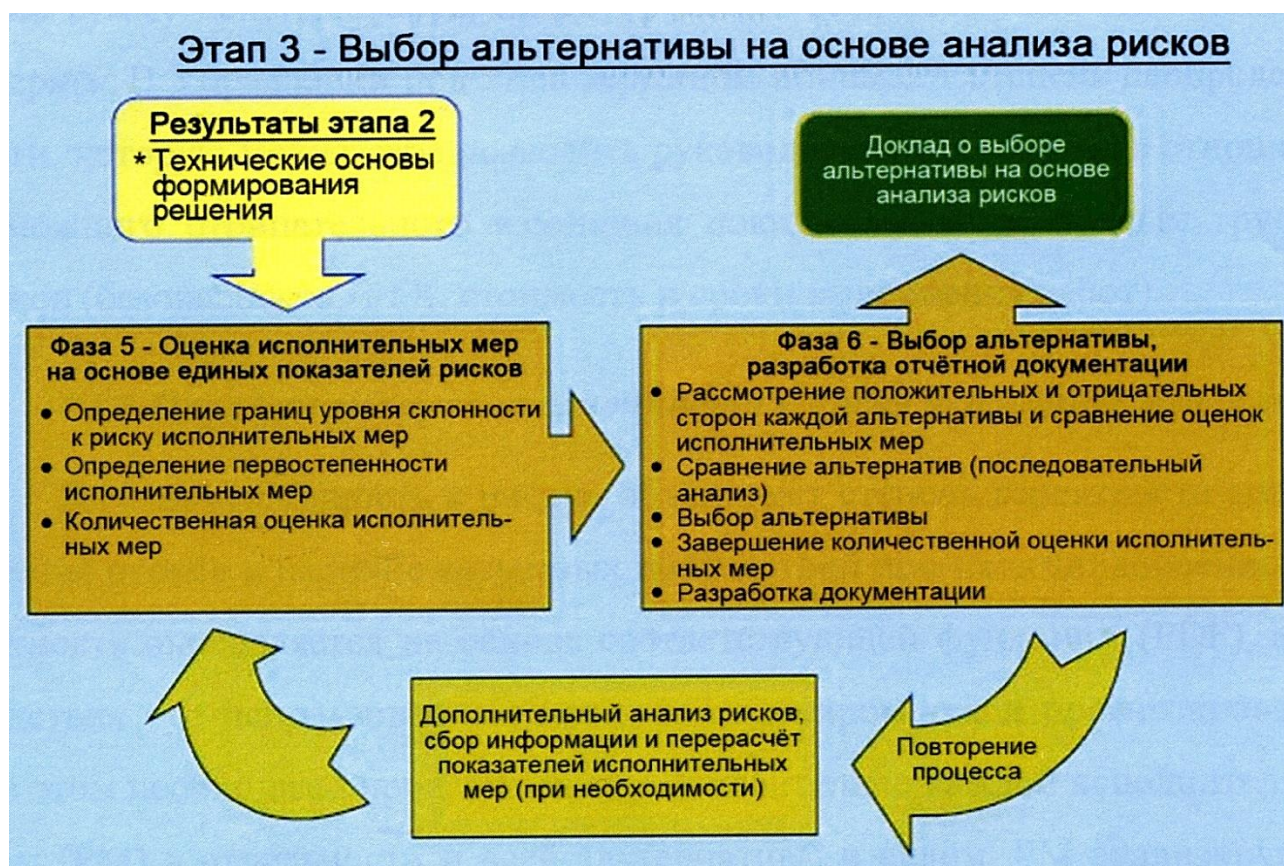


Рис. 8. – Содержание процесса выбора альтернативы на основе анализа рисков [58]

Решение по окончательному выбору концепции принимает руководитель проекта, опираясь на полученные аргументированные оценки всех возможных вариантов (конфигураций). Для окончательного выбора необходимо провести их сравнительный анализ, в том числе по результатам оценки рисков. Но риски не являются единственным и ключевым критерием для выбора альтернативы: проект должен соответствовать требованиям, утверждённым в техническом задании. Для этого производится количественная оценка выполнения требований проекта для каждой рассматриваемой альтернативы. Также при принятии решения учитывается склонность к риску (уровень риска, который может быть принят при реализации проекта).

В результате выбора альтернативы разработчики получают концепцию проекта/программы, а также перечень исполнительных мер и их количественные параметры, которые в ходе дальнейшей реализации проекта/программы трансформируются в технические требования, включаемые в основу технических

зданий для проектировщиков, программистов, или составляют техническую основу при заключении контрактов с производителями (поставщиками). При этом возможные риски выявлены, определены их уровень, вероятность возникновения, проанализированы последствия.

Таким образом, управление рисками является неотъемлемым элементом методологии проектного управления NASA. Однако описанный метод формирования и анализа альтернатив не использует строгие математические методы и опирается на коллективное мнение экспертов. Следовательно, стопроцентная гарантия успеха не обеспечивается.

В Министерстве обороны США также зафиксированы подходы к формированию альтернативных решений в рамках нормативных документов, описывающих методологию системного инжиниринга. Алгоритм процесса формулирования конструкторских решений представлен на рис. 9.

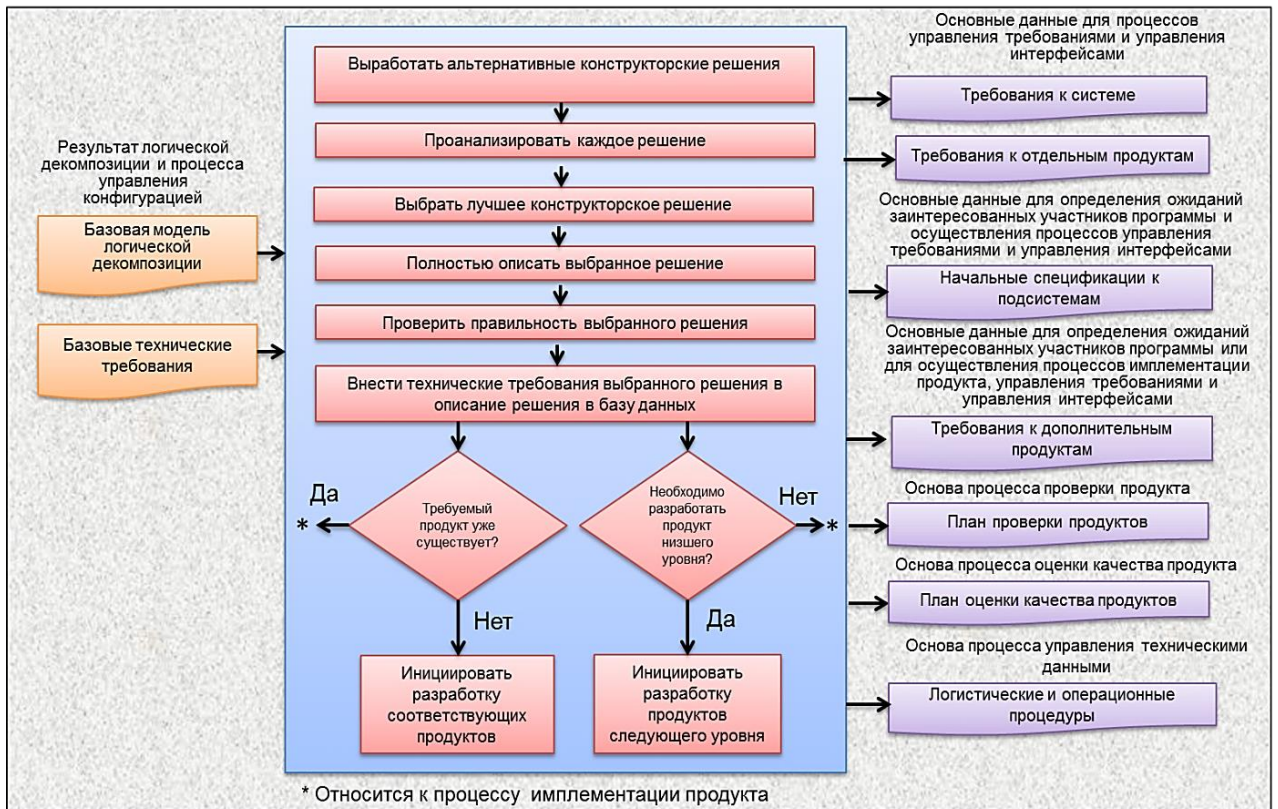


Рис. 9 – Процесс формулирования конструкторских решений

Анализ альтернатив проводится по следующим аспектам:

- какие новые технологии предлагается разработать и внедрить;
- эффективность системы;
- стоимость;
- сроки выполнения работ;
- присущие варианту риски.

Анализ стремятся проводить отдельной командой инженеров-системотехников, в обязанности которой вменяется проведение анализа и выбор окончательного варианта, т.к. технические команды, принявшие участие непосредственно в разработке вариантов конструкторских решений, в ходе анализа альтернатив относятся к своим предложениям субъективно.

1.4 Зарубежная практика выбора проектных решений

В США неоднократно проводились концептуальные исследования, одним из этапов которых был анализ альтернатив при определении концепций принципиально новых военных АК. К этому числу можно отнести работы, посвящённые исследованию перспективных самолётов, в т. ч.: стратегического бомбардировщика АТВ/ В-2 [108], среднего военно-транспортного самолёта АТТ [100] и лёгкого военно-транспортного самолёта АТ³ специального назначения [92, 103]. В качестве примера подхода рассмотрим одну из них – исследование концепции бомбардировщика АТВ.

Предварительное исследование концепции перспективного стратегического бомбардировщика выполнено при проведении НИР ISADS в 1978 г. Контракт BBC был заключён с фирмами Boeing и Rockwell, которые в соответствии с ТТЗ (расчётный профиль полёта показан на рис. 10) рассмотрели для перспективного самолёта возможности выполнения 5 задач:

- упрощённая конструкция с низкой стоимостью,
- минимальный вес самолёта,
- быстрое преодоление ПВО,

- сверхзвуковая скорость прорыва в зону ПВО,
- защита лазерным оружием от поражения в воздухе.

В результате исследований фирмы разработали по 5 технических концепций, анализ которых стал содержанием последующих научно-исследовательских работ ВВС, направленных на завершение работ по формированию концепции и составлению тактико-технических требований к самолёту. Обе фирмы опубликовали результаты своих исследований, при этом информация фирмы Rockwell отличается большей подробностью и позволяет судить о методе исследований.

Для решения 4-х из 5-ти задач фирма Rockwell рассмотрела 34 варианта концепций. В качестве примера на рис. 11 приведены концепции, предназначенные для упрощения и уменьшения стоимости конструкции самолёта.



Рис. 10 – Исследования концепции бомбардировщика АТВ

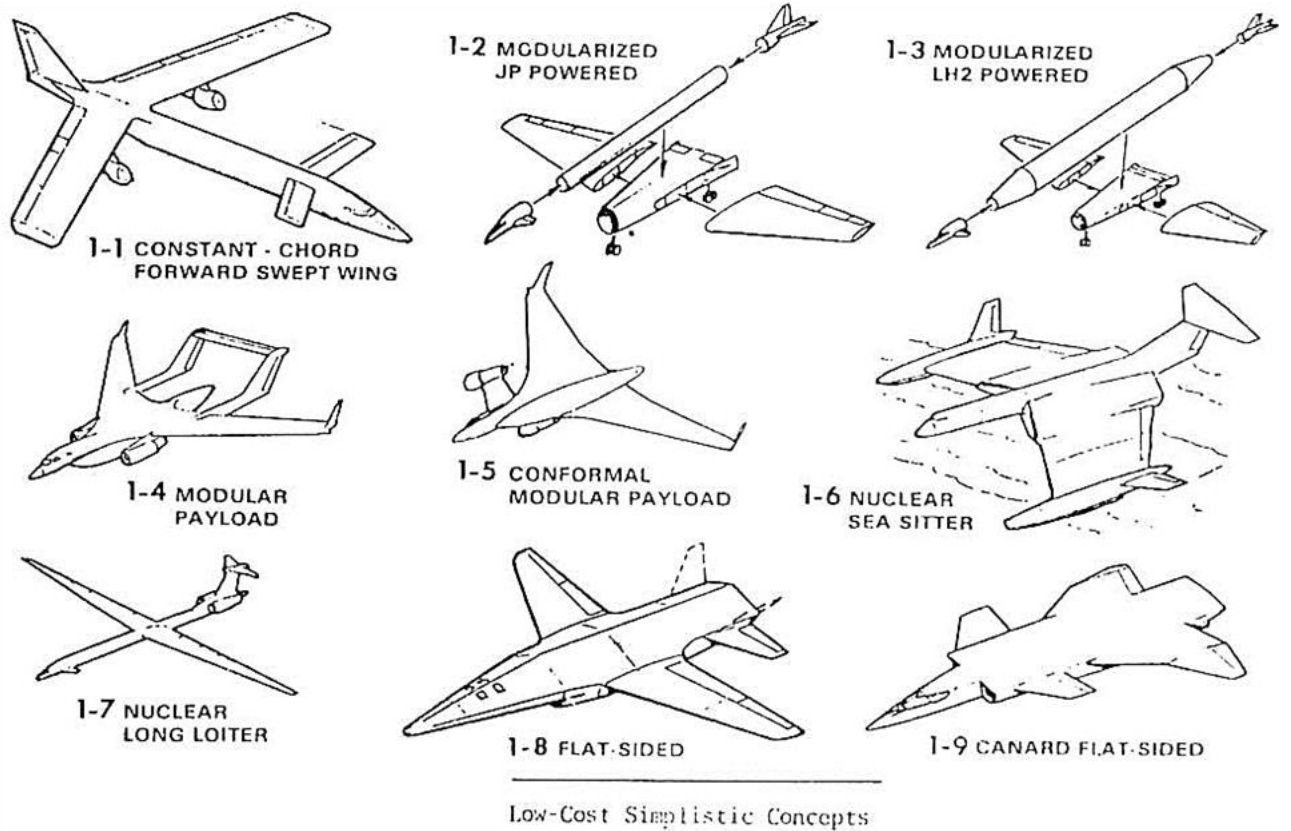


Рис. 11 – Концепции, предназначенные для упрощения и уменьшения стоимости конструкции самолёта

По каждой концепции приведено подробное описание, аналогично разработаны альтернативные варианты концепций, решающих остальные задачи. Их анализ позволяет сделать вывод, что при формировании вариантов разработчики исходили из научно-технического задела и того идейного багажа, составлению которого было уделено особое внимание в начале исследования.

Ряды разработанных концепций являются результатом так называемого «мозгового штурма», т.е. несут в себе элемент случайности, возникающей при непосредственном использовании отдельных технологий и их комбинаций из числа рекомендованных.

Фирмой Rockwell была выполнена оценка описанных схем для выбора двух или трех лучших концепций каждой категории самолётов. При этом было использовано несколько оценочных параметров, полученных для каждой концепции членами различных функциональных групп (анализ аэродинамики, силовой установки, весовых характеристик, технологии, конструкций, лётно-

технических данных и эксплуатации). По этим параметрам были выполнены сравнительные оценки различных концепций внутри каждой категории. Для каждой категории был подготовлен комплект рекомендаций и правил, относящихся к данной категории, технических усовершенствований, которые могут найти применение в каждой категории самолётов, и критериев оценки.

Не предпринимались какие-либо попытки получить окончательные количественные данные, на основе которых можно было бы выбрать лучшие концепции. Вместо этого комитет, состоящий из руководителя и нескольких представителей функциональных групп, рассмотрел приближенные данные, отражающие мнения членов функциональных групп о концепциях, и проанализировал достоинства каждой концепции. Затем следовал процесс исключения тех концепций, которые по тем или иным причинам не отвечали отдельным требованиям. К числу таких причин относится высокий технический риск, незначительные преимущества и неприемлемые стоимостные характеристики. Процесс отбора продолжается до тех пор, пока в каждой категории не останется 2-3 кандидата. В некоторых случаях выбранная концепция объединяла в себе черты нескольких концептуальных схем.

Затем отобранные концепции были подвергнуты процессу предварительного определения количественных характеристик с целью выбора одной базовой схемы для каждой категории.

Исследование Rockwell завершается описанием отличительных признаков лучшей концепции, обеспечивающих её эффективность, и перечнем ключевых технологий, от которых в дальнейшем будет зависеть техническая осуществимость проекта.

Существенным отличием отечественной методологии (метод ЦАГИ) от зарубежных технологий является информационная содержательность результатов исследования. В американской технологии испытываемые варианты концепции представляют собой случайное сочетание идей в результате «мозгового штурма». Один из вариантов признается лучшим, но и после выбора остаётся вопрос, не существуют ли варианты, реализующие ту же концепцию другими средствами.

Чтобы снять эту неопределённость, выполняется дублирование исследований (задание ВВС выполняли одновременно фирмы Boeing и Rockwell). Чтобы изучить различия, выявившиеся при сравнении результатов этих фирм, проводится дополнительная НИР, цель которой – найти то общее, что характерно для дублирующих исследований. Такое компромиссное решение и будет представлять собой согласованную модель концепции.

Данный подход решает задачу, но требует сложной организации и является неэкономичным. Для его осуществления требуется многочисленный персонал, большое количество времени и средств.

Выводы по главе 1

В настоящее время не существует отечественных стандартов, регламентирующих управление качеством *научных* проектов. Существуют отдельные специализированные стандарты, такие как ГОСТ 2.118-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Техническое предложение и ГОСТ РВ 15.103 – 2004 Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей, а также ГОСТ Р 57193-2016 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем, которые указывают на необходимость сравнения нескольких вариантов изделия на этапе выбора технической концепции. Однако правило формирования альтернатив в них не определено.

Проанализированы различные практические подходы к организации жизненного цикла проектов на концептуальной стадии, такие как конструкторская разработка, аудит научных проектов, разработка технической концепции.

Среди зарубежных нормативных документов рассмотрена разработанная NASA методология RIDM. К её недостаткам можно отнести: экспертное формирование перечня допустимых альтернатив (в связи с чем существует риск формирования неполного перечня и выбора неоптимального варианта концепции), а также отсутствие правила определения необходимого количества технических концепций (в результате для снижения рисков это количество должно быть увеличено, что приводит к большим затратам ресурсов).

Анализ зарубежного опыта выбора перспективных технологий для концептуальных проектов показал разные подходы разработчиков к формированию альтернативных научных концепций. Можно выделить следующие характерные для них особенности:

- для выполнения одной миссии разрабатывается несколько вариантов технической концепции;
- состав каждой концепции определяется полезными технологиями;

- расчётный ряд концепций формируется методом мозгового штурма и не гарантирует полноты изучения;
- недостатки метода компенсируются затратной организацией дублирующих исследований с привлечением независимых разработчиков;
- принятие решения о выборе концепции не следует непосредственно из результатов исследования.

Отсюда следует, что для управления качеством научной концепции на начальном этапе проектов авиационной техники необходимо применение методов, лишённых отмеченных недостатков, и на практике обеспечивающих выбор оптимальных вариантов концепции для исследования ключевых технологий в интересах следующих этапов концептуального проектирования.

2 Элементы теории концептуального проектирования

К областям знаний, применяемых в области концептуального проектирования летательных аппаратов, можно отнести программы подготовки специалистов по проектированию самолётов, вертолётов и другой техники в высших учебных заведениях; военные и гражданские стандарты с описанием требований к содержанию конструкторской документации при выполнении аванпроекта (технического предложения) и эскизного проекта изделия авиационной техники; современные международные и российские стандарты по проектному менеджменту и управлению рисками; научные методы многодисциплинарной оптимизации и системы автоматизированного проектирования летательных аппаратов, в том числе разработанные в ЦАГИ. К этому направлению следует отнести методы теории систем и исследования операций, посвящённые «внешнему проектированию» функциональных моделей, описывающих взаимодействие изделия с внешней средой и дающих оценку его эффективности.

В настоящем разделе рассмотрены элементы разработанной в ЦАГИ теории концептуального проектирования, которые образуют универсальную логико-математическую модель многогранной проектной деятельности с согласованным понятийным аппаратом.

Научный подход к теории концептуального проектирования в ней формируется, прежде всего, в связи с логикой теории систем и теории множеств. Системный метод получил всеобщее признание как метод решения сложных задач. К их числу, например, относятся организационные и экономические задачи, которым и были изначально адресованы математические методы моделирования систем. При всей обширности научных знаний в этой области они оставляют место для новых исследований.

2.1 Целеполагание

Управление любым проектом начинается с осознания его цели. Как правило, ей является не новый материальный объект, а его потребительские ценности, т.е.

функции, которыми можно будет воспользоваться на практике. При этом объект нужен лишь в качестве средства достижения цели. Для этого организуется проект создания изделия с новыми свойствами. Цель инновации состоит в получении функций, соответствующих ожидаемым потребностям. Описание цели должно быть достаточно информативным, чтобы судить о достигнутом соответствии, поэтому к её определению предъявляется ряд требований. Цель должна быть:

- конкретной по сути, исчерпывающе определённой и ясно осознанной;
- структурированной «деревом цели» с подчинёнными задачами;
- измеримой с возможностью оценки результата;
- имеющей связь с ресурсами;
- привязанной ко времени осуществления проекта;
- достижимой в итоге проектной деятельности.

При выполнении этих условий проектное задание будет включать определённые требования к объекту в виде связей и ограничений, наложенных на целевые индикаторы, а сама цель может интерпретироваться как необходимая (планируемая) система Z нормированных показателей объекта (рис. 12).



Рис. 12 – Система требований к объекту проектирования

Проектируемый объект представляет собой систему, состоящую из двух частей, отражающих внутренние связи объекта и связь объекта с внешней средой.

Проектное задание – связь с внешней средой – должно включать определённые требования к объекту в виде связей и ограничений, наложенных на целевые индикаторы, а сама цель может интерпретироваться как потребная (планируемая) система Z нормированных показателей объекта

$$Z \subset N_p \times N_r \times N_e, \quad (2.1)$$

где N_p – множество условий воздействия среды, ограниченных нормами;

N_r – множество используемых ресурсов, ограниченных технологиями;

N_e – множество полезных эффектов, ограниченных требованиями.

Объект находится под воздействием широкого поля внешних реакций, в том числе ресурсов среды R , получая из них средства $r \in R$ для покрытия издержек своего функционирования, и испытывает управляющие воздействия N_p поля заданий, нормирующих внешний спрос на продукцию E локальной системы с заданной целевой функцией. Её отклики на сигналы среды составляют, соответственно, различные полезные эффекты $e \in E$ и поле запросов на внешние ресурсы N_r для осуществления процесса, в котором участвует объект.

2.2 Объект и система

Задачи отыскания оптимального управления породили кибернетическое представление о *целенаправленно управляемом объекте*. Такая модель, выделяя из глобальной среды локальную систему, специализированную на решении одной задачи, включает информацию о внутренних связях объекта $\dot{x} = f_1(x, u, t)$, фазовом состоянии параметров $x \in V$ и процессе выработки управляющих сигналов $u \in Q$, изменяющих состояние объекта (рис. 13) в зависимости от времени t . В этой постановке описания способа функционирования Q и устройства V , а значит, и внешние связи объекта предполагаются известными.

Объект находится под воздействием широкого поля внешних реакций $B_i (i = 1, 2, \dots, m)$, в том числе ресурсов среды R , получая из них средства $r \in R$ для покрытия издержек своего функционирования, и испытывает управляющие

воздействия N_e поля заданий, нормирующих внешний спрос на продукцию E локальной системы с заданной целевой функцией (2.1). Её отклики на сигналы среды составляют, соответственно, различные полезные эффекты $e \in E$ и поле запросов на внешние ресурсы N_r для осуществления процесса, в котором участвует объект (рис. 14), управляемый оператором или автоматом.

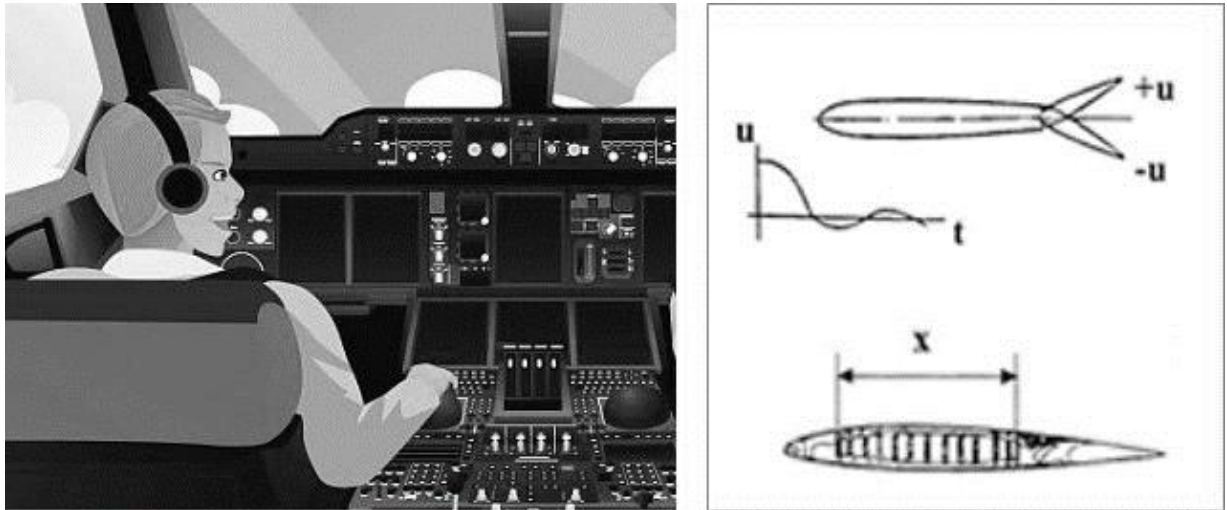


Рис. 13 – Оператор и модель объекта управления

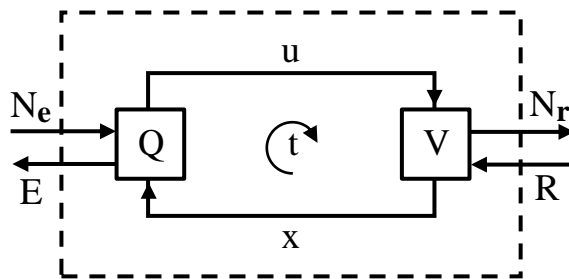


Рис. 14 – Система «вход–выход»

Системный метод усматривает в предметах, прежде всего, признаки субъекта, абстрагируясь от его внутреннего содержания и уделяя основное внимание взаимным интересам субъекта и среды. Особый вклад системного метода в решение комплексных проблем обусловлен тем, что благодаря языку теории множеств он позволяет из всего поля реакций B_i , описывающих взаимодействия объекта и среды, выявить наиболее существенные взаимосвязи, чтобы включить их в исследование иерархических систем большой сложности.

Общая теория под системой понимает отношение вида $S \subset X_{i=1}^m B_i$ на непустых множествах, образующих декартово произведение [40]. Для рассмотренного выше субъекта управления целевая функция и ресурсы образуют непересекающиеся множества, которые создают систему типа «вход–выход»: $S \subset R \times E$. Элементы этого отношения образуют множество упорядоченных пар: $S \subset \{(r, e) \mid r \in R \wedge e \in E\}$.

Подобная модель системы получила широкое распространение, в частности, в задачах «исследования операций». Независимо от областей применения [13, 81] методы исследования операций включают выбор критерия эффективности объекта, построение модели его функционирования (развития) в среде обитания и введение исходных данных, применение разнообразных методов математического обеспечения и поиск оптимального управления объектом.

Описанный метод исследования применяют также для «внешнего проектирования», которое позволяет для моделей объектов с известными свойствами определять наилучшие условия применения или из нескольких конкурирующих объектов рекомендовать наиболее успешный в моделируемых условиях применения, не вдаваясь в особенности его устройства.

Задача проектирования объекта, в том числе концептуального, принципиально отличается от задачи управления объектом. Как правило, *задача проектирования* объекта формулируется следующим образом: создать организацию или конструкцию, в частном случае их элементы, обеспечивающие наилучшее выполнение задачи при некоторых требованиях, накладываемых целеполаганием. Согласно этой задаче оператор-проектант лично не участвует в изменениях состояния объекта во время t его действия, как на рис. 12. Однако он знает, что возможны определённые программы управления $u(t) \in Q$ несуществующим объектом, так же как есть выбор из множества различных способов его функционирования, описанных моделями Q . Проектант знаком с разными моделями V возможного устройства будущего объекта, особенности которых могут быть описаны параметрами $x \in V$ (рис. 14) и оценены как потребными для их реализации ресурсами из числа возможных $r \in R$, так и

локальными эффектами $e \in E$ из числа полезных. В число проектных данных входит также геометрическая информация, описывающая форму объекта $g \in F$.

В связи с этим в задаче проектирования преобразуется смысл обозначений, знакомых по теории управления. Теперь фазовые параметры не столько характеризуют текущее состояние объекта (эти детали нужны другим специалистам), сколько являются признаками особого типа программы действия и агрегатного состояния среди множества сведений о других способах и устройствах из того ассортимента, которым располагает и оперирует проектант во время t управления проектом.

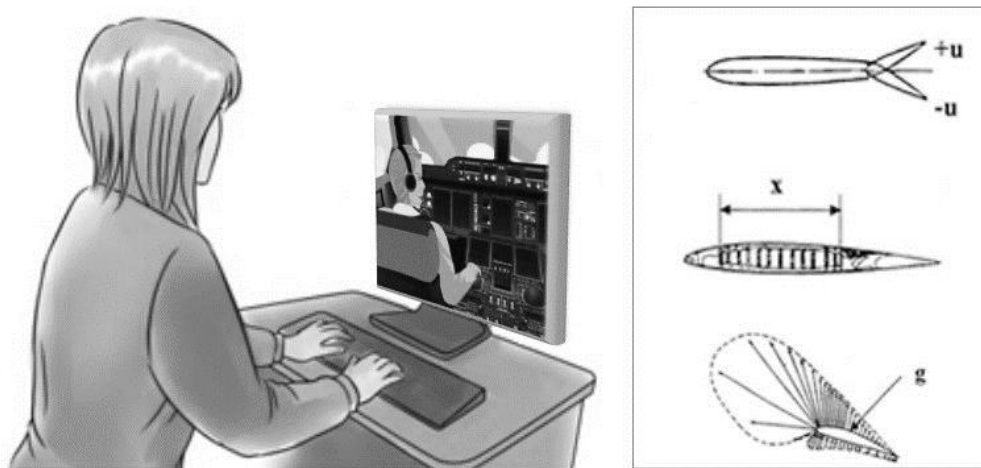


Рис. 15 – Проектант и модель объекта проектирования

Однако задача проектирования не может ограничиться только этим рассмотрением, поскольку задание на проект (2.1) должно содержать также характеристику условий его применения с указанием на различные внешние воздействия.

Схема системы проектирования может быть представлена в виде треугольной модели (рис. 16). В описание связей локальной и глобальной среды вошли понятия элементарных сил p взаимодействия, составляющих часть внешних нагрузок P различной физико-химической природы, в свою очередь включённых в поле допустимых условий эксплуатации N_p . Последние нормируются и определяют весь спектр воздействий среды. необходимо отметить, что имеется в виду

воздействие не только внешних, например, аэродинамических сил для летательного аппарата, но и внутренних, например, инерционных, в том числе со стороны топлива или груза летательного аппарата.

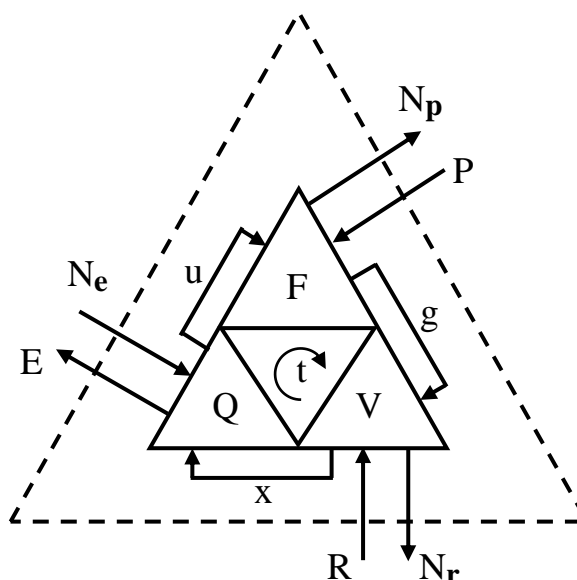


Рис. 16 – Система «нагрузка-затраты-эффект»

Таким образом, модель системы проектирования сложнее, чем модель системы управления, для неё характерны тройственные отношения (степень сложности $n = 3$) вместо бинарных (степень сложности $n = 2$).

В результате формируется *система* S_z - модель формализованных связей объекта со средой обитания, объединенных и ограниченных целью проекта

$$S_z \subset R \times P \times E, \quad (2.2)$$

где P – множество управляющих воздействий среды;

R – множество ресурсов среды;

E – множество полезных эффектов.

Факторы взаимодействия объекта с внешней средой (R, P, E) и нормируемые проектным заданием требования (N_r, N_p, N_e) измеряются одинаковыми по своей природе величинами (например, располагаемый и потребный эффект). Так как системы (2.1) и (2.2) сопоставимы, это делает возможной верификацию разрабатываемой модели объекта.

В модели объекта понятие организации M_u объединяет множество динамических элементов $u \in Q$, которые характеризуют модели взаимодействующих в общем технологическом процессе способов функционирования $Q \subset M_u$. Последние отличаются такими признаками, как приемы, режимы, последовательность и условия выполнения операций, реализующих различные программы.

Эти понятия соотносятся с интерпретацией структуры M_x как множества статических элементов $x \in V$ системы, которые характеризуют модели деталей, узлов, агрегатов, изделий и других орудий $V \subset M_x$, предназначенных для выполнения технологических процессов. Устройства как структурные единицы могут отличаться материалом, размерами, архитектурой и другими параметрами состояния.

То, что в задаче проектирования определено как способ и устройство, составляет предмет патентно-изобретательской деятельности и входит в число основных инженерных понятий.

Форма – это особый фактор объекта. Достаточно сказать, что сам процесс проектирования сопровождается разработкой наглядной технической документации. При этом наиболее универсальной информацией – геометрической (g) – обладают схемы и чертежи, которые характеризуют плотность распределения материала в пространстве и обеспечивают единообразное понимание формы участниками проекта на всех стадиях его реализации. Понятием формы F в общем случае целесообразно характеризовать любую информацию о границах объекта и его элементов. Множество её проявлений M_g составляет пограничную область взаимодействия с материальной средой: $g \in F \subset M_g$.

Согласование моделей объекта и субъекта проектирования [15] требует использования единого языка для их описания. Иерархически организованные субъекты получили обозначение «система» на языке теории множеств. Пользуясь этим же языком, представим информационно-логическую модель объекта как объектовую систему

$$S_o \subset V \times F \times Q . \quad (2.3)$$

Описание (2.3) системы объекта S_o может быть представлено множеством упорядоченных троек: $S_o \subset \{(x, g, u) \mid x \in V \wedge g \in F \wedge u \in Q\}$. В таком виде представлено все возможное разнообразие компонентов объектовой системы, включающей модели устройства, формы и способа действия объекта. Однако действительное число локализованных подсистем определяется сложностью задачи проектирования, показатель которой может быть $n \geq 3$. Так, например, если требуется одним устройством произвести три различных действия (многоцелевая система), то сложность такой системы увеличится до $n = 5$ и она будет включать пять подсистем (V, F, Q_1, Q_2, Q_3) . Наоборот, если способ функционирования облика задан и не требует проектирования, то сложность задачи ограничена ($n = 2$) поиском решающей системы вида (V, F, \emptyset) .

Таким образом, объектовая система (2.3) любой сложности n может быть представлена в виде: $S_o \subset X_{i=1}^n A_i$, где A_i – локальное множество подсистемы из общего поля взаимодействующих в составе объектовой системы.

Итак, сложилось два различных понятия «системы». В обоих случаях это упорядоченные множества, в том числе система S_z – модель формализованных связей объекта со средой обитания, объединённых целью проекта. Вторая из рассмотренных – система S_o – модель обособленного от среды обитания объекта, состоящего из взаимосвязанных компонентов (подсистем), интегрированных в одно целое для достижения цели проекта. В данной работе оба понятия составляют единство субъективного и объективного, являются формализованными моделями и в этом качестве представляют интерес как предметы исследования проектантом, деятельность которого направлена на достижение цели проекта.

2.3 Понятия концепции и принципов, идеи и технологии

Для понимания внутренних связей объекта определим понятия концепции и принципов действия, устройства и формы, образующих информационно-логическую модель объекта.

В соответствии с теорией поля систему S_0 можно рассматривать в качестве пространственного скалярного поля вида $S_0 \subset X_{i=1}^n A_i$, в каждой точке которого взаимодействующие множества подсистем A_i производят функцию вида $S_z \subset X_{i=1}^n B_i$.

Ключевой характеристикой деятельности управляющего проектанта является его целеустремленность. При этом система S_z служит для измерения целевых факторов (2.2) и получения информации для принятия решений. Объектовая система S_0 отображает результаты (2.3) целенаправленных усилий проектанта, однако собственно направление процесса проектирования заключено в более содержательной модели «концепции».

Целенаправленность проекта определяется на векторном поле $\vec{K} \subset X_{i=1}^n A_i$, в каждой точке которого взаимодействие векторов \vec{A}_i производит функцию (2.2). На этом поле задачей проекта является формирование его концепции

$$\vec{K} \subset \vec{V} \times \vec{F} \times \vec{Q}, \quad (2.4)$$

определяющей весь дальнейший ход проектирования. Пространственный вектор полностью определяется его проекциями, в том числе принципами устройства, формы и действия соответственно:

$$\vec{V} = V \cdot \vec{\lambda}_x; \quad \vec{F} = F \cdot \vec{\lambda}_g; \quad \vec{Q} = Q \cdot \vec{\lambda}_u, \quad (2.5)$$

где V, F, Q – скалярные компоненты объектов системы;

$\vec{\lambda}_x, \vec{\lambda}_g, \vec{\lambda}_u$, – векторы единичной длины (орты), задающие направление вектора концепции.

Здесь множества вида \vec{A} представляют собой направленные свертки логически связанной информации и именуются принципами. Элементами вектора \vec{A} являются скалярные аргументы вида A (компоненты объектовой системы) и единичные векторы вида $\vec{\lambda}$, которые по смыслу являются идеями, придающими то или иное содержание модели объекта.

Таким образом, принципы в составе концепции являются векторами (рис. 17). Величина каждого из них определяется информационной свёрткой множества компонентов системы S_0 , а направление задано ортом-идеей, в котором

заклучена объединяющая логика принципа, выраженная его именем (названием, формулой).

Принципы – направленные свёртки логически связанной информации.



Рис. 17 – Принципы формы, устройства и способа действия

Принцип формы содержит свёртку информации F о границах объекта и его элементов. Наиболее универсальной информацией – геометрической – обладают схемы и чертежи, которые характеризуют плотность распределения материала в пространстве и пограничную область взаимодействия с внешней средой.

Принцип устройства содержит свёртку информации V о внутренней структуре объекта: множестве статических элементов системы, которые представляют собой детали, узлы, агрегаты, изделия и другие орудия, предназначенные для выполнения технологических процессов.

Принцип действия содержит свёртку информации Q об организации объекта: множестве динамических элементов, которыми является взаимодействующие в общем технологическом процессе способы функционирования, отличающиеся такими признаками, как приёмы, режимы, последовательность и условия выполнения операций, реализующих отдельные программы управления.

Понятие объектовой системы позволяет определить термин «концепция». В разработанной методологии концепция – это сочетание принципов действия, устройства и формы, образующих информационно-логическую модель объекта. В составе концепции принципы являются векторами вида $\vec{A}_i = \vec{\lambda}_i \cdot A_i$, величина A_i каждого из которых определяется соответствующим компонентом объектовой

системы, направление к цели задано ортом-идеей $\vec{\lambda}_i$, в которой заключена объединяющая логика принципа. Таким образом, для формирования концепции необходима идея, направленная на достижение цели (2.1).

Идея – это неделимая информационно-логическая единица, независимая от времени. В содержании идей заключена суть предметов и явлений материального мира. Идея представляет собой сущность не отдельного феномена действительности, но является прообразом некоторого типа/вида предметов и явлений (в переводе с греческого «идея» – вид или форма). Оставаясь неизменными, единичные идеи могут группироваться в различных сочетаниях в зависимости от объединяющей концепции. Это можно сравнить с участием атомов в строении различных молекул. По смыслу идеями являются единичные вектора вида $\vec{\lambda}$, придающими то или иное содержание модели объекта.

Как видно из (2.5), между ортами-идеями и компонентами системы нет однозначной связи в составе принципов из-за их различной природы. Это обстоятельство вносит неопределённость в описание принципа (даже при наличии идеи), делая его в состоянии свёртки ноуменальным.

Например, идея «качения по поверхности» создаёт выбор из нескольких принципов для органов циклического движения, таких как цилиндр (колесо) с единственной осью вращения (рис. 18), сфера (шар) с неограниченным числом осей вращения и, наконец, шагающие опоры с дискретными контактными поверхностями.

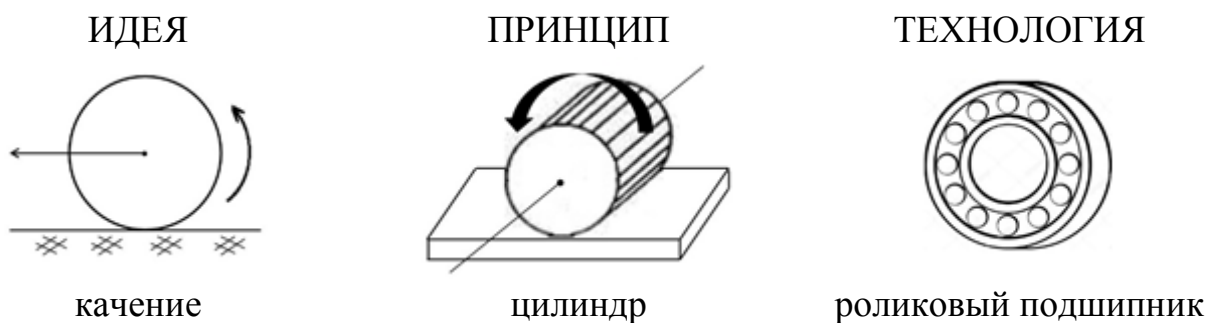


Рис.18 – Идея качения, принцип и технология на её основе

Рассмотрим аналогичный по смыслу пример из авиационной практики. Так, новым направлением создания боевых самолётов современного поколения стало выполнение требований малой заметности в различных диапазонах спектра, из которых важнейшим является радиолокационный с наибольшей дальностью обнаружения цели в зоне действия средств ПВО. В связи с этим при создании самолётов в соответствии с идеей минимальной «эффективной поверхности рассеяния» (ЭПР) появился ряд принципов проектирования основных отражателей в составе планера и силовой установки (например, рис. 19).

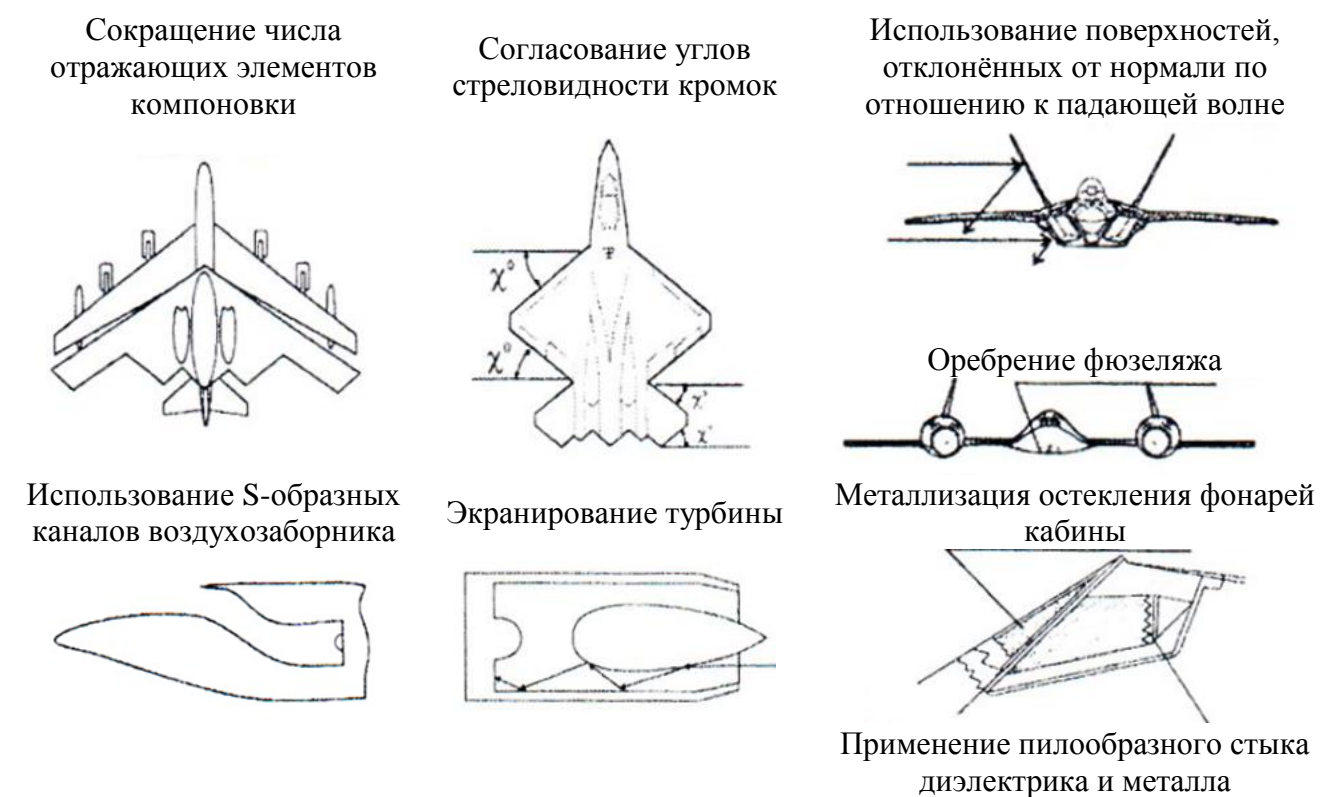


Рис. 19 – Принципы уменьшения радиолокационной заметности самолётов [11]

В число возможных мер включён принцип согласования углов стреловидности передних и задних кромок крыла, оперения и других элементов планера. В этом случае зондирующее излучение РЛС будет отражаться от всех кромок в одном узком диапазоне углов, и на экране оператора ПВО появится один сигнал отражения в этом ракурсе. Вероятность его обнаружения значительно меньше чем вероятность обнаружения серии сигналов от разных частей самолёта

на круговой диаграмме. Для реализации этой идеи в самолёте есть ряд возможностей в связи с применением геометрии шеврона, пилы или ромба в конструкции самолёта (рис. 20), когда обеспечивается параллельность кромок, сводящая к минимуму число пиков отражённого сигнала РЛС. Именно эти варианты исполнения крыла и нашли воплощение в различных проектах малозаметных военных самолётов.



Рис. 20 – Формы крыла в плане с параллельными кромками [11]

Из примеров следует вывод, что для достижения поставленной цели проектант выбирает концепцию будущего изделия, включающей различные идеи. Для каждой идеи проектант ищет адекватные принципы, а для материализации идей и принципов ему нужен выбор так называемых технологий.

При выполнении концептуальных исследований технологиями называют научные разработки, предназначенные для практического применения. Такое понимание вошло в обиход проектной деятельности вместе со шкалой «уровней готовности технологии» [28], которая оценивает степень приближения разрабатываемого проекта к поставленной цели. Поскольку цель проекта (2.2) нормирует свойства будущего натурального объекта, то его целевая система должна быть показана в естественных условиях применения. Тогда для верификации модели (2.3) объекта и её элементов по мере их разработки должны производиться ее материальные аналогии со своими характеристиками вида (2.2). Аналогию разной полноты могут обеспечить физические модели, функциональные демонстраторы и, наконец, полномасштабные изделия.

Для их создания необходимы производственные технологии [72], каждая из которых является совокупностью взаимодействующих операций, оборудования и условий для передела сырья в готовое изделие. Здесь «технология» – это

индуктивная система, объединяющая в своём составе *понимание* (греч. – «логос») особенностей аналогии с моделью объекта (2.3) и *умение* (греч. – «техно») в располагаемых материальных условиях преобразовать её в предметы/явления действительности.

Следовательно, технология предусматривает осуществление двух процессов, из которых один обуславливает второй. Первый направлен на подготовку проекта аналогии, сохраняющей особенности модели объекта (2.3). На практике условия аналогии и её реализуемости соблюдаются благодаря участию автора-проектанта, конструктора, технолога и пользователя проекта. Связанный с первым второй процесс направлен на практическое осуществление, например, конструкторского проекта аналога (рис. 21) в действующих условиях производства. С этой целью разрабатываются производственные технологии, в соответствии с которыми из подходящих материалов изготавливается конечный продукт, а на более ранних стадиях разработки – материальные аналоги информационной модели объекта или ее компонентов, которые делают возможной периодическую верификацию цели проекта.

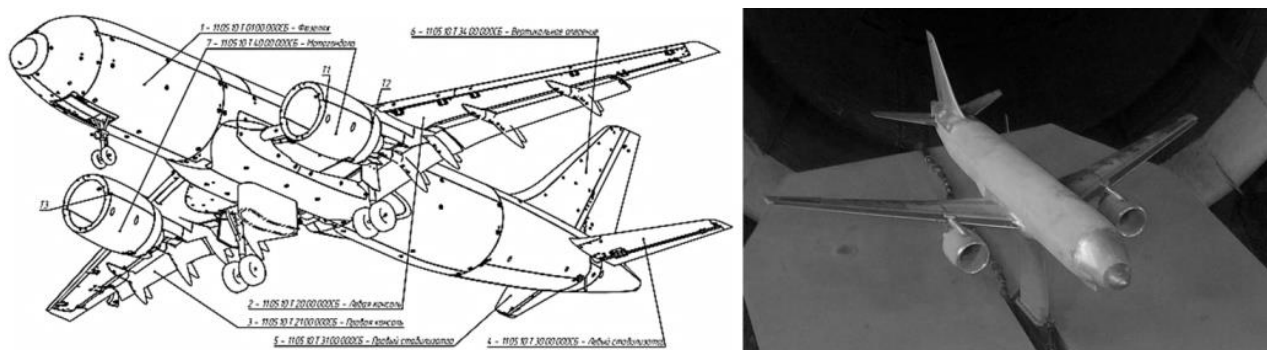


Рис. 21 – Проект конструкции и изготовленная модель (аналог) самолёта для аэродинамических испытаний

Участие многих субъектов и материальных факторов в разработке и осуществлении технологического проекта вносит значительное разнообразие и множество наблюдаемых отличий в практическое исполнение одинаковых идей, принципов, концепций. С этим приходится считаться даже на такой ранней стадии жизненного цикла, как концептуальный проект.

Технология – сравнительно новое и многоликое понятие, которое используется разными участниками жизненного цикла (рис. 1) со своими представлениями о его смысле и значении. Однако общим для технологий любой стадии разработки является то, что в результате их реализации происходит воплощение ментальных идей в материальной среде. Именно посредством технологий создаются практические возможности достижения цели проекта.

Технологии, с одной стороны, осуществляют породившие их принципы, являясь проводниками идей, а с другой – обеспечивают соответствие принципов тем условиям, которые предусмотрены целью проекта. Различные условия осуществления одной и той же идеи приводят к появлению разных технологий. При этом идея остаётся их общим прообразом.

2.4 Неопределённости и риски

Идеи и принципы познаются человеческим сознанием как интуитивно (мнения или гипотезы), так и конкретно-логическим путём через изучение явлений природы, выявление, сравнение и упорядочение фактов.

Среди идей можно выделить множества двух типов: множество реальных идей – фактов $Re(\lambda)$ и множество мнимых идей – гипотез $Im(\lambda)$. Вместе с названными идеями два типа принципов (реальных и мнимых) могут составлять комплексную модель концепции. Концептуальное проектирование на основе комплексной информации с мнимой составляющей из-за недостатка достоверной информации сопровождается множеством неопределённостей, которые должны быть исключены на пути к созданию реального объекта.

Последовательное устранение неопределённостей в содержании концепции составляет одну из основных проблем концептуального проектирования. Сам метод проектирования должен гарантировать при этом получение достоверного решения.

В начальный момент исследования область поиска новой концепции безгранична и неопределённа, а вероятность отыскания правильного решения

ничтожна мала. Для принятия решения о запуске проекта необходима информация о его эффективности и технической реализуемости.

Для того чтобы получить такую информацию, необходимо выполнить несколько объективно необходимых этапов концептуального исследования (рис. 3). При этом каждый следующий этап осуществим при условии, что нужная для него исходная информация получена на предыдущем этапе.

В начале (Этап 0) создаётся информационное обеспечение – база данных из множества способов и устройств, которые могут быть полезны для решения новой задачи (рис. 22).

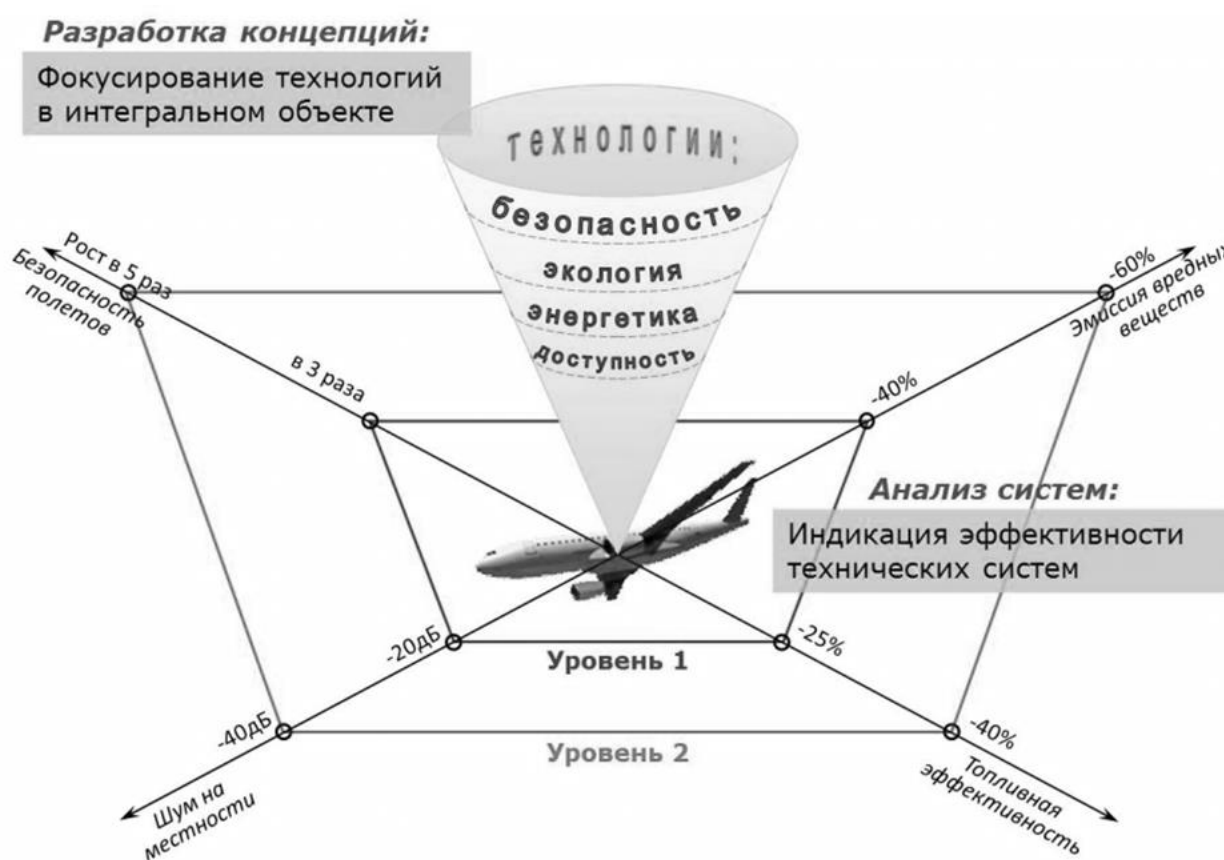


Рис. 22 – Связь технологий с задачами развития воздушного транспорта

Этот поиск сопровождается предварительной оценкой чувствительности системы характеристик будущего объекта к разнообразным технологиям (из числа известных), чтобы отказаться от очевидно бесполезных.

Применение апробированной, реалистичной информации способствует успеху концептуального проектирования. С начала проектирования в этом состоит

особая роль известных по опыту практических технологий из множества $Re(\lambda)$. Их изучение составляет часть Этапа 0 и предваряет Этап 1.

Результатом начальных усилий становится множество вида $\{(x, g, u) \mid x \in M_x \wedge g \in M_g \wedge u \in M_u\}$, которое моделирует технологический базис для решения задач проекта, а также множество вида $\{(r, p, e) \mid r \in M_r \wedge p \in M_p \wedge e \in M_e\}$, моделирующее множество реакций внешней среды на применение технологий. Таким образом, устраняется *неопределённость* источника информации для проектных решений.

К рискам, характерным для этого этапа, следует отнести неполноту информационного обеспечения, разрозненность фактических данных, возникновение мнимой информации в результате творческих усилий по решению уникальных задач проекта. Методом исключения части рисков и ограничения их влияния на результаты дальнейшего проектирования является разработка и использование правил, обобщающих известные факты, превращая общую для них закономерность в универсальную рекомендацию для разработки других проектных решений с аналогичными полезными свойствами, но в ином техническом исполнении. Это обеспечивает бóльшую свободу выбора проектных решений и позволяет избежать их противоречивости в составе единой концепции проекта.

На Этапе 1 анализируются различные комбинации из предложенных принципов (технологий), которые позволяют сформировать ряд возможных концепций изделия в целом. Характеристики вариантов (оцениваются и сравниваются, из них выбираются наиболее эффективные.

Основным техническим риском данного этапа является выбор неправильной концепции. Ключевой причиной данного риска является построение недостаточного числа вариантов изделия и неправильный метод их формирования.

В результате Этапа 1 преодолевается принципиальная неопределённость расчётной концепции, которая в дальнейшем становится предметом глубокого изучения. При этом, хотя состав концепции и определён, остаются другие риски.

Так, возможное наличие нескольких принципов (технологий) в области определения одной идеи порождает некоторые неопределённости при

формировании технической концепции, а также в системных оценках. Для их устранения существуют специальные методы. Однако по завершении этапа ещё остаётся риск внутренней несогласованности между элементами концепции объекта, перечень которых был определён как относительно лучшее сочетание принципов в сравнении с другими вариантами. Но для совершенства концепции требуется ещё и оптимальный баланс между её разнородными элементами, тогда образуется и однозначная система характеристик объекта.

На Этапе 2 элементы концепции (принципы, идеи) согласуются между собой так, чтобы максимизировать эффективность в составе целевой системы S_z . Основные технические риски данного этапа связаны с неопределённостью в отдельных характеристиках, что исключает возможность достоверной верификации концептуального проекта. Отдельные элементы концепции оказывают различное влияние на её эффективность. Те из них, которые являются наименее изученными, а также те, к изменениям которых целевая функция особенно чувствительна, составляют перечень ключевых элементов выбранной концепции (рис. 23).



Рис. 23 – Ключевые элементы в расчётной концепции самолёта

Характеристики элементов системы можно считать случайными величинами с заданными законами распределения, поэтому оценка степени влияния на

интегральные критерии сводится к определению вероятностных характеристик выходных величин, характеризующих систему. Для решения этой задачи часто используются статистические методы.

Экспертная неопределённость в отдельных характеристиках объекта создаёт для проектанта неопределённость его целевой функции и исключает возможность достоверной верификации концептуального проекта. Устранить этот риск расчётными исследованиями в большинстве случаев невозможно, поскольку они не избавляют от мнимого характера экспертных оценок. Необходима валидация критических характеристик. Таким образом, дальнейшие исследования должны быть направлены на уменьшение рисков обеспечения технической реализуемости и эффективности разрабатываемой концепции и её технологий.

В связи с этим Этап 3 посвящается экспериментальным исследованиям ключевых элементов (физическим, стендовым, имитационным), которые в лабораторных условиях дают первые доказательства их технической реализуемости, наличия эксплуатационных преимуществ и позволяют предварительно установить соответствие характеристик требованиям к изделию. Техническими рисками данного этапа является риск несоответствия разработанной концепции критериям задания (1) и риски неполной аналогии расчётной концепции натуре. Создаются условия для перехода к демонстрационной стадии проекта, чтобы снизить указанные риски.

Дело в том, что лабораторные условия для испытания множества моделей накладывают ограничения на их размеры, следуют различным критериям подобия [62] и выполняются на различных экспериментальных установках. Их единство в проекте обеспечивается универсальной моделью объекта, как правило, геометрической. Продемонстрировать физическое единство и согласованную эффективность может модель прототипа, действующая в натуральных условиях. При создании сложных технических объектов, таких как пилотируемый летательный аппарат, задача создания и испытаний демонстратора технологий выходит за пределы компетенций научных организаций и требует привлечения в проект конструкторской организации (ОКБ промышленности). В условиях

демонстрационной стадии представляется возможность решить проблему трансфера научных разработок (технологий) по завершении концептуального проекта.

Таким образом, в процессе концептуального проектирования каждому этапу проектирования (рис. 3) присущи свои неопределённости и риски, связанные с уникальностью объекта. Для успешной разработки концептуального проекта необходимо их выявить, оценить и устранить. В настоящее время существуют универсальные методы качественного анализа и оценки рисков. Методы количественной оценки рисков предстоит создать для каждого этапа концептуального проектирования.

Анализ рисков предназначен не только для выбора концепции и разработки надёжных технологий, но и для выработки других мер по управлению проектом (финансовых, организационных, временных), которые позволят снизить вероятность возникновения негативной ситуации или минимизировать её последствия.

Управление рисками в целом является неотъемлемым атрибутом концептуального проектирования.

Выводы по главе 2

Представлены основные элементы методологии концептуального проектирования ЦАГИ, в рамках которой будет разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив. Сформулировано понятие концепции в терминах теории множеств, теории поля и общей теории систем. В общем понятии системы выделено два частных: объектовая система и целевая система (модель связей объекта со средой обитания). Соответствующее понятие целевой системы расширено включением фактора «нагрузка» от внешней среды, который дополняет известные факторы «эффект-затраты». Концепция определена как сочетание нескольких принципов. Принцип определён как свёртка информации о компонентах объектовой системы, направление которой задано единичным вектором-идеей. В понятия концепции и системы введён принцип «формы», который вместе с принципами «действия» и «устройства» объекта, образует его трёхмерную модель.

Процесс концептуального проектирования представлен как последовательность объективно необходимых этапов, направленных на устранение неопределённостей, выявленных проектантом. Происхождение неопределённостей связано с комплексным характером информации, насыщающей проект не только реальными, но и мнимыми данными, исходящими от проектанта. Это следствие уникальности проекта, требующей творческого воображения для решения новой задачи. Дан краткий обзор особенностей каждого этапа концептуального проектирования. Отмечено, что управление рисками неотделимо от управления проектом. Отмечено, что ключевым риском анализа альтернатив является риск выбора неоптимальной научной концепции.

Предложенная теория позволяет оперировать элементами концепции создаваемого изделия, опираясь на законы математической логики.

Представленные материалы не являются исчерпывающими знаниями для решения задач концептуального проектирования во всей их сложности, однако являются достаточными для разработки и представления метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта.

В описанном подходе смысл комплексного представления концепции и системы с мнимыми составляющими в их содержании состоит в том, чтобы объяснить причины неопределённостей и рисков, которые сопровождают проект.

3 Разработка метода управления качеством научного проекта при формировании и анализе альтернатив

Метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта разрабатывается в рамках рассмотренной в разделе 2 методологии концептуального проектирования. Он формируется с применением методов факторного анализа и полнофакторного эксперимента. Рассмотрим эти методы подробнее и обоснуем их использование.

3.1 Факторный анализ

Факторный анализ – это класс методов, которые приводят к выделению определённого числа основных факторов. Используется, главным образом, для ограничения сложности задачи.

Основное предположение факторного анализа состоит в том, что явления в определённой области исследований, несмотря на разнородность и изменчивость, могут быть описаны относительно небольшим числом функциональных единиц, параметров или факторов [55].

Фактор – это латентная переменная, конструируемая таким образом, чтобы можно было объяснить корреляцию между набором переменных.

Факторный анализ используют в следующих ситуациях [53]:

- для определения основных факторов, которые объясняют связи в наборе переменных;
- для определения нового, меньшего по размеру, набора не коррелирующих переменных, заменяющих исходный набор коррелирующих переменных, на основании которого дальше выполняется многомерный анализ;
- для преобразования большего по размеру набора в меньший набор ясно выраженных переменных для использования их в последующем многомерном анализе.

Наиболее плодотворно использование факторного анализа на ранних стадиях исследования и в тех областях, где лишь начинается научный поиск, где еще не окончательно сформулированы законы и основные концепции, а также там, где трудно проводить эксперименты для оценки предложенных гипотез. Факторный анализ может помочь определить первые приближенные характеристики закономерностей, лежащих в основе явления, и сформулировать общие заключения о направлениях, в которых нужно вести дальнейшие непосредственные экспериментальные исследования [38]. Метод факторного анализа позволяет найти основные влияния или функциональные единицы, являющиеся относительно независимыми, т.е. те, которые прежде всего должны учитываться при дальнейшем экспериментировании. Контролируемый эксперимент, осуществляемый после вступительного анализа основной структуры данной области исследования, будет методически более совершенным по сравнению с экспериментом на переменных, выбранных случайно или априорно. Если не предпринимается усилий получить начальные данные о внутренней организации или структуре, скрытой под разнообразием явлений, или если приблизительно не определено, какие доступные переменные выражают собой менее многочисленные, но более существенные влияния, лежащие в основе изменений, экспериментальные исследования будут в значительной степени осуществляться «вслепую» и вызовут большой расход ресурсов.

И хотя роль факторных методов наиболее важна на первых этапах исследования, тем не менее, в определённых случаях они могут быть использованы и в давно ведущихся исследованиях, приводя к новой формулировке хорошо изученных проблем. Результаты, полученные с помощью факторного анализа, могут также помочь найти новый путь в поисках фундаментальных концепций той или иной отрасли науки.

Если попытаться кратко охарактеризовать факторный анализ как статистический метод, то важно упомянуть следующие соображения:

1. Факторный анализ, в противоположность контролируемому эксперименту, опирается в основном на наблюдения над естественным варьированием переменных.

2. При использовании факторного анализа совокупность переменных, изучаемых с точки зрения связей между ними, не выбирается произвольно: этот метод позволяет выявить основные факторы, оказывающие существенное влияние в данной области.

3. Факторный анализ не требует предварительных гипотез, наоборот, он сам может служить методом выдвижения гипотез, а также выступать критерием гипотез, опирающихся на данные, полученные другими методами.

4. Факторный анализ не требует априорных предположений относительно того, какие переменные независимы, а какие зависимы, он не гипертрофирует причинные связи и решает вопрос об их мере в процессе дальнейших исследований.

С математической точки зрения факторный анализ аналогичен множественному регрессионному анализу в том смысле, что каждая переменная выражена как линейная комбинация латентных факторов. Доля дисперсии отдельной переменной, принадлежащая общим факторам (и разделяемая с другими переменными) называется *общностью*. Ковариацию среди переменных описывают небольшим числом общих факторов, плюс характерный фактор для каждой переменной. Эти факторы явно не видны. Если переменные нормированы, то факторную модель можно представить следующим образом

$$X_i = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + A_{i3}F_3 + \dots + A_{im}F_m + V_iU_i,$$

где X_i – i -я нормированная переменная;

A_{ij} – нормированный коэффициент множественной регрессии переменной i по общему фактору j ;

F_j – общий фактор;

V_i – нормированный коэффициент регрессии переменной i по характерному фактору i ;

U_i – характерный фактор для переменной i ;

m – число общих факторов.

Характерные факторы не коррелируют между собой и с общими факторами.

Общие факторы в свою очередь также можно выразить линейными комбинациями наблюдаемых переменных:

$$F_i = W_{i1}X_1 + W_{i2}X_2 + W_{i3}X_3 + \dots + W_{ik}X_k,$$

где F_i – оценка i -го фактора;

W_i – весовой коэффициент или коэффициент значения фактора;

k – число переменных.

Можно подобрать веса так, чтобы первый коэффициент значения фактора объяснял наибольшую долю полной дисперсии. Затем отобрать второй набор весов так, чтобы второй фактор вносил наибольший вклад в остаточную дисперсию при условии, что он не коррелирует с первым фактором. Этот же принцип применяется для отбора дополнительных весов для дополнительных факторов. Таким образом, можно оценить факторы так, чтобы их значения, в отличие от значений исходных переменных, не коррелировали. Более того, первый фактор объясняет наибольшую дисперсию в данных, второй фактор – вторую по величине дисперсию и т.д.

Существуют три основных этапа факторного анализа [55]:

- 1) Подготовка матрицы ковариаций / матрицы корреляций.
- 2) Выделение первоначальных факторов.
- 3) Вращение с целью получения окончательного решения.

Однако можно выделить также предварительный этап, который состоит в чётком определении цели факторного анализа и определении переменных, подвергаемых факторному анализу. Переменные определяются исходя из опыта предыдущих исследований, теоретических выкладок и по усмотрению исследователя.

Применение факторного анализа на этапе выбора оптимальной концепции в рамках разработанного метода имеет следующие особенности:

- 1) В проектном исследовании в качестве факторов рассматриваются принципы, производящие концепцию.

2) Теория планирования экспериментов оперирует независимыми факторами, значения которых при описании объектовой системы (S_0) задаются параметрически для сравнительной оценки соответствующих критериев целевой системы (S_z).

3) Независимость испытуемых факторов проявляется при планировании экспериментов как возможность управления значениями одних факторов без обусловленной связи с другими, т.е. независимо от значений других факторов объектовой системы (S_0).

Выбор факторов проектантом основан на оценке чувствительности критериев целевой системы (S_z) к изменениям параметров объектовой системы (S_0), чтобы включить в план экспериментов ограниченное число (n) наиболее значимых факторов (задача факторного анализа).

3.2 Полнофакторный эксперимент

Большинство научных исследований связано с экспериментом. Однако нередко исследования организуются хаотично, из-за чего их полезность оказывается недостаточной. Для повышения эффективности исследований необходимо научное планирование эксперимента.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью [1].

Эксперимент может быть физическим, психологическим или модельным. Он может проводиться как непосредственно на самом объекте, так и на его модели. Моделирование – это метод изучения объектов, при котором вместо оригинала (натуры) эксперимент проводится на модели, а результаты количественно распространяют на оригинал (натурное сооружение).

Термин «модель» применяют в основном в двух значениях [76]. Первое следует из определения моделирования: модель – это объект, который в процессе эксперимента заменяет оригинал. В этом случае говорят о *материальной модели*. Кроме этого, широко используется другое значение: модель – это схема объекта (явления), отражающая его существенные стороны, которая возникает в сознании

человека в процессе познания. В таком случае речь идёт о *мысленной модели*. В связи с этим предмет моделирования часто определяют как построение и практическое использование мысленных либо материальных моделей. Любая материальная модель строится на основе мысленной. Математическая модель – один из вариантов мысленной модели.

Таким образом, эксперимент может быть организован как на материальных, так и на мысленных моделях.

Планирование эксперимента используется для разнообразных задач, но одним из наиболее распространённых является поиск оптимальных условий (задачи оптимизации). Во многих задачах проектирования и исследования характеристик технических устройств необходимо найти оптимальное решение, т.е. найти наилучшее сочетание внутренних и внешних факторов, которые бы давали наиболее высокие критериальные показатели эффективности устройства [40].

При решении задачи используются математические модели объекта исследования (уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами).

Каждый фактор – это переменная величина, которая может принимать в опыте одно из нескольких значений из области определения, которая может быть непрерывной или дискретной. Факторы могут быть количественными и качественными. Требования к факторам: управляемость и однозначность. Требования к совокупности факторов: совместимость и отсутствие линейной корреляции.

Фиксированный набор значений (уровней) факторов определяет одно из возможных состояний объекта исследования. Совокупность всех возможных состояний определяет сложность «чёрного ящика» и соответствует общему числу возможных опытов.

Для выбора модели необходимо выявить, какие факторы оказывают существенное влияние на параметр оптимизации и какова степень этого влияния. Другими словами, необходимо найти зависимость этого параметра оптимизации от всех существенных факторов (построить модель). Далее эта модель исследуется с

целью поиска такого сочетания факторов и таких численных значений их уровней, которые давали бы наибольшее (или наименьшее) значение обобщённого параметра оптимизации.

Планированию эксперимента предшествует этап неформализованных решений, направленных на выбор локальной области факторного пространства [1].

При этом оцениваются границы областей определения факторов, задаваемые различными типами ограничений:

- принципиальные ограничения для значений факторов, которые не могут быть нарушены ни при каких условиях. Например, если фактором является температура, то нижний предел – абсолютный нуль;
- ограничения, связанные с технико-экономическими соображениями, например, со стоимостью сырья, временем ведения процесса и т.п.
- ограничения конкретными условиями проведения процесса, например, существующей аппаратурой, технологией, организацией.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней, называется *полным факторным экспериментом*. Если число уровней равно двум (верхний и нижний, да или нет), то это полный факторный эксперимент типа 2^n . В этом случае, если число факторов известно, можно сразу найти число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов. Для этого используется простая формула [1]

$$N = 2^n,$$

где N – число опытов,

n – число факторов,

2 – число уровней.

Условия эксперимента обычно представляют в виде таблицы – матрицы планирования эксперимента, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов.

В рамках рассматриваемой методологии концептуального проектирования концепция – это сочетание актуальных принципов действия, устройства и формы.

Указанные принципы в терминах планирования эксперимента являются основными факторами и изначально носят дискретный характер, а эксперимент проводится на мысленных моделях, где опытом является каждый вариант концепции.

Таким образом, для трёх принципов построение 8 вариантов концепций методом полнофакторного эксперимента наглядно можно представить в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Варианты концепций

Принципы	Варианты комбинаций							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Способ,	0	0	0	0	1	1	1	1
Форма,	0	1	0	1	0	1	0	1
Устройство	0	0	1	1	0	0	1	1

$$C_3 = 2^3 = 8,$$

$n=3$ – число упорядоченных принципов в качестве существенных факторов, определяющих сложность задачи поиска;

2 – байт информации, возникающей из сравнения альтернатив (типа «0» или типа «1»);

«0» и «1» обозначают факт отсутствия или наличия принципиальной новизны.

Отметим, что рассмотренные выше методы факторного анализа и полнофакторного эксперимента применяются в отдельных проектах ЦАГИ при проведении численных и физических экспериментов, имеющих целью найти рациональное сочетание геометрических параметров для вновь проектируемого объекта.

3.3 Метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта

Теория концептуального проектирования, основанная на математике теории множеств, теории поля и векторного анализа, стала естественным продолжением теории систем. Формализованное понятие концепции позволило определить предмет управления качеством при выполнении научного проекта. В настоящей работе поиск оптимальной (наиболее качественной) технической концепции формулируется как задача дискретного программирования, а именно:

Проектант, используя источник знаний (базу данных)

$$M_{S_0} \subset M_x \times M_g \times M_u$$

и генерируя идеи $\vec{\lambda}_i$, формирует принципы вида

$$\vec{A}_i = \vec{\lambda}_i A_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

направленные на достижение поставленной цели

$$Z \subset N_p \times N_r \times N_e.$$

Для концепций известной сложности (например, $n=3$) на каждом шаге поиска $j = 0, 1, 2, \dots, c-1$ создаются концепции (коалиции) вида

$$\vec{K}(j) \subset \vec{V}(j) \times \vec{F}(j) \times \vec{Q}(j),$$

Ищется допустимая программа поиска, определённая на траектории концепций

$$\vec{K}(0), \vec{K}(1) \dots \vec{K}(c-1),$$

с соответствующими значениями на поле целевых показателей

$$S_z(0), S_z(1) \dots S_z(c-1).$$

Тогда решением является концепция, производящая **показатели качества** такие, что

$$\hat{S}_z = \max_{P \subset N_p} \{E/R\}.$$

Таким образом, выстраивается программа поиска оптимальной концепции, по каждому варианту рассчитывается значение на поле целевых показателей. Дальнейшее сравнительное исследование приводит к решению задачи поиска, определяются показатели качества.

На основе описанных выше методов факторного анализа и полнофакторного эксперимента в рамках описанной в разделе 2 методологии предлагается метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта (рис. 24).

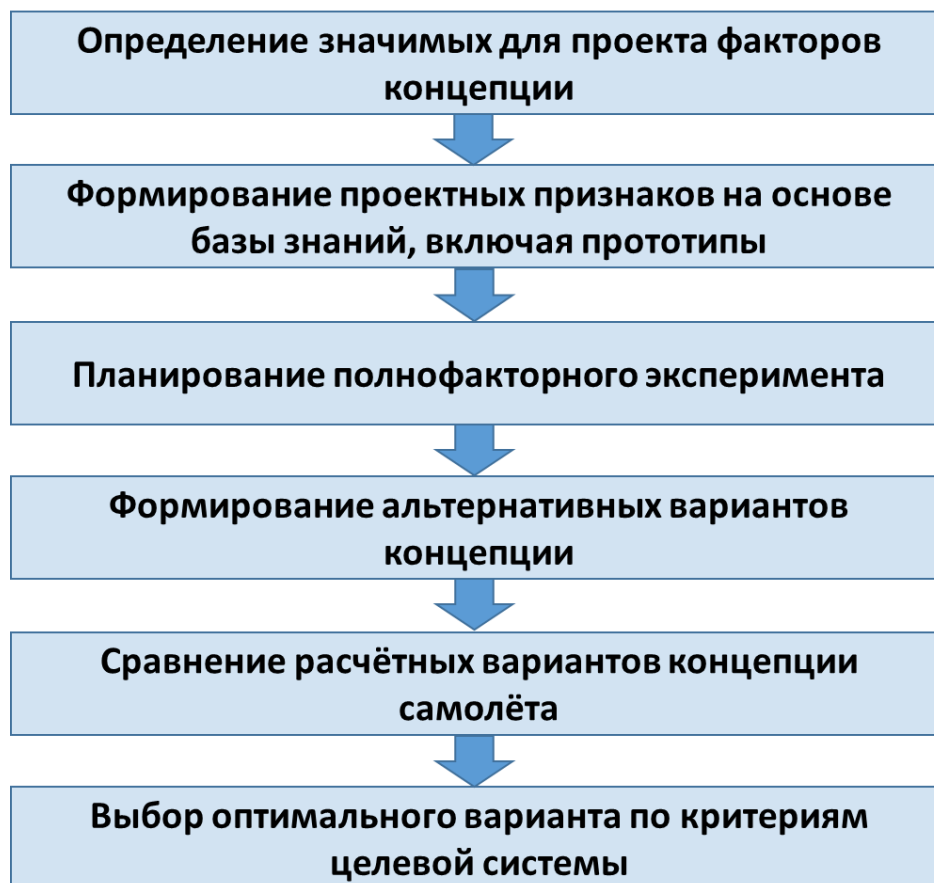


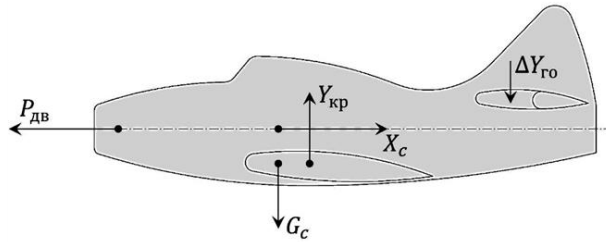
Рис. 24 – Метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив

Первым шагом метода является определение значимых для проекта факторов концепции. Как уже было замечено ранее, в терминах методологии концептуального проектирования в качестве факторов рассматриваются принципы, производящие концепцию. Они определяются с учётом заданных требований к проекту.

Так, на рис. 25 представлены две задачи – задача устойчивости и управляемости в полёте и задача полёта на дальность. Аэродинамический $\frac{M \cdot K}{C_e}$ и весовой ($G_{Cy} + G_k$) факторы являются определяющими в техническом совершенстве

транспортного самолёта. Именно в этих направлениях необходим поиск принципов, улучшающих его транспортную функцию.

Задача 1 - устойчивость и управляемость в полете



Задача 2 - полет на дальность:

$$L \sim \frac{MK}{C_e} \ln\left(1 + \frac{G_T}{G_{sp} + G_{сн} + G_{об} + G_{cy} + G_k}\right)$$

Аэрогазодинамический фактор компоновки
 Принцип формы (F) планера и силовой установки

 Весовой фактор конструкции
 Принцип устройства конструкции (V_2) планера и силовой установки

M – фактор скорости; K – аэродинамическое качество самолёта; C_e – удельный расход топлива; G_T , $G_{сн}$, $G_{об}$, G_{cy} , G_k – компоненты весовой сводки самолёта, включающей соответственно вес топлива, снаряжения, оборудования, силовой установки и конструкции планера

Рис. 25 – Выявление значимых факторов

Таким образом, значимыми факторами в проектах авиационной техники в соответствии с этими задачами являются безопасное управление, аэродинамическое и весовое совершенство планера и силовой установки.

Зачастую полезными для достижения задач, поставленных перед военной авиацией, оказываются принципы интеграции. Они также могут быть полезны и для гражданской. Возможные альтернативные принципы представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Альтернативные принципы интеграции

	Независимые факторы	Тип «0» (обычный)	Тип «1» (интегральный)
Q	Способ аэродинамической балансировки	Аэродинамическая балансировка оперением (нормальная схема)	Аэродинамическая самобалансировка оперением (схема «бесхвостка»)
F	Аэродинамическая форма планера и силовой установки	Дифференциальная	Интегральная
V	Устройство конструкции планера и силовой установки	Дифференциальное	Интегральное

Определение существенных для проекта факторов:

- позволяет перейти от математической модели технической концепции к морфологической с проектными признаками;
- образует правило построения полнофакторного проектного эксперимента.

Вторым шагом метода является формирование проектных признаков на основе существующей базы знаний. Для этого шага важным является наличие научно-технического задела по соответствующей проекту тематике. Его существование обеспечивает возможность разработки инновационных проектов авиационной техники. Переход от принципов к конкретным проектным признакам требует высокого уровня «экспертности» проектной команды. На данном этапе особое внимание уделяется коммуникациям между участниками проекта:

- все участники проекта должны пройти обучение методу управления качеством научной концепции в условиях совместной работы;
- осуществляется тесное взаимодействие с предметными специалистами;
- к проекту привлекаются специалисты смежных компетенций (по проектированию, конструированию и производству ЛА);

– используется существующий у проектной команды опыт по созданию прототипов и оригинальных проектных решений.

В таблице 5 для примера представлены проектные признаки факторов интегрального типа «1».

Таблица 5 – Проектные признаки факторов интегрального типа

S_0	Независимые факторы	Некоторые проектные признаки	Полезные эффекты
Q	Способ аэродинамической балансировки	Интегрированное хвостовое оперение или схема «бесхвостка»	Аэродинамическая устойчивость и управляемость самолёта по тангажу, рысканию и крену
F	Аэродинамическая форма планера и силовой установки	Увеличенный размах крыла, малая поверхность трения, большая хорда, развитый центроплан или наплыв крыла для интеграции с фюзеляжем и силовой установкой, отсутствие пилонов, мотогондол и обтекателей шасси	Безопасность от сваливания, малое аэродинамическое сопротивление, увеличенная скорость полёта, увеличенные несущие свойства, положительная аэродинамическая интерференция, «струйный» эффект (возможно синергетическое улучшение конструкции)
V	Устройство конструкции планера и силовой установки	Большая строительная высота лонжеронов (относительная толщина) крыла, подкосы крыла, малый размах и стреловидность крыла, уменьшенная поверхность обшивки	Безопасность от разрушения, облегчённая конструкция, повышенная прочность и жёсткость (возможно синергетическое улучшение аэродинамики)

После формирования проектных признаков следующим шагом является планирование полнофакторного эксперимента 2^n . На рис. 26 дана символическая интерпретация сочетаний, которая иллюстрирует различные комбинации формы, устройства и способа в трёхмерной модели объекта. Особый интерес представляют крайние комбинации. Так, в первой слева соединяются пустые подмножества (белые треугольники). Она не включает новых элементов, их внутренняя связь известна и считается нормой. Это прототип, от которого проектная команда в

дальнейшем отходит, отказываясь от присущей прототипу внутренней связи (внутренние треугольники), используя принципиально новые технологии (тёмные треугольники). Построение ряда вариантов в данном случае заканчивается абсолютно новым объектом, в котором не осталось ничего от прототипа.

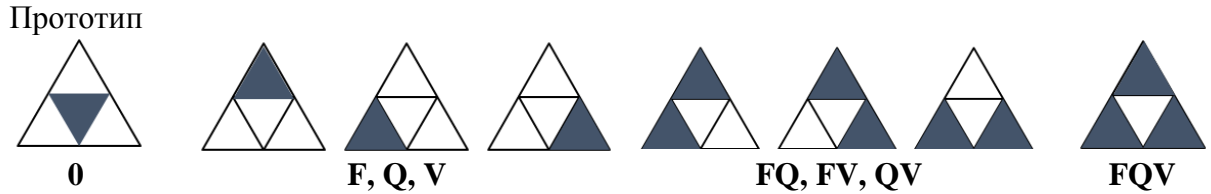


Рис. 26 – Ряд вариантов концепции

Следующим шагом является представление каждой концепции в виде модели объекта (самолёта). В качестве примера на рис. 27 приведён ряд концепций транспортного самолёта, соответствующий задаче поиска средств уменьшения эксплуатационных расходов.

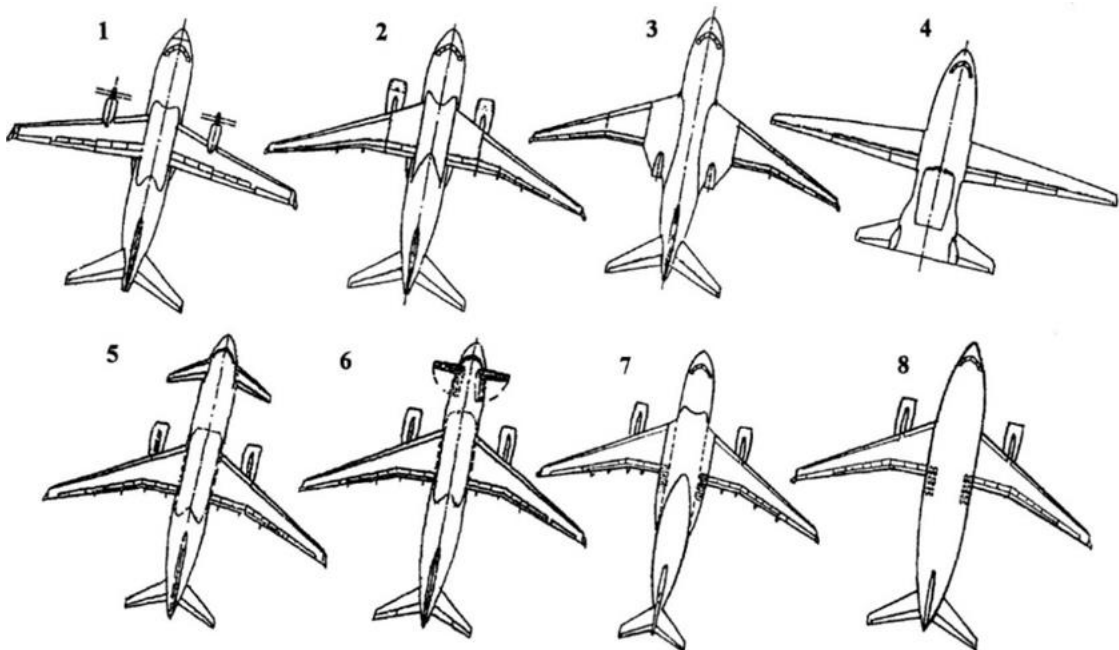


Рис. 27 – Альтернативные варианты транспортного самолёта

Описанный порядок обеспечивает проектанту информированность и свободу выбора, нужные для принятия решения. При этом необходимо исключить заинтересованные посторонние воздействия на ход эксперимента. Этому должны

способствовать: право всех участников исследования свободно влиять на планирование серии опытов до их проведения, независимость мнений участников при оценке результатов эксперимента и объективность системы оценок, приводящей к выбору окончательного решения.

Все варианты оставляют открытым центральный вопрос о выборе рациональной концепции, но их число достаточно, чтобы составить оптимальную траекторию. На рис. 28 приведена функция вероятности успеха при выборе рациональной концепции от числа анализируемых вариантов концепции при $n=3$. Из него видно, что неполное построение ряда вариантов концепции (число сочетаний менее 2^n) ведёт к пропорциональному снижению вероятности отыскания наилучшего варианта, поэтому необходим контроль за достаточным числом концепций в ряду подготовленных к поиску рационального решения.

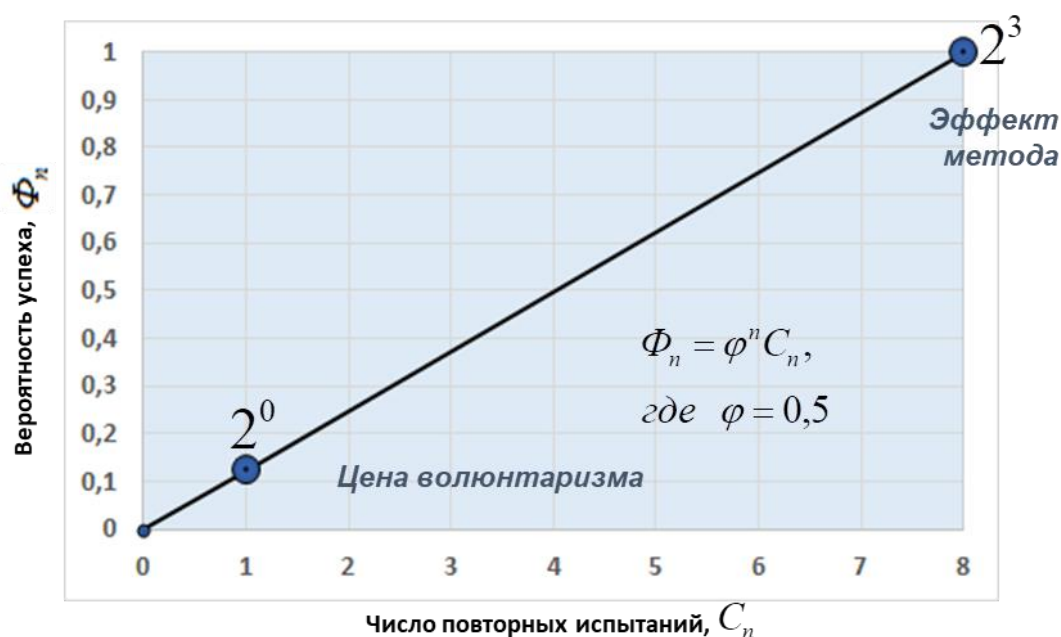


Рис. 28 – Вероятность успеха прямого поиска

Предположим, что для рассматриваемой модели (2.5) $n=3$. Следовательно, такой модели соответствует ряд сочетаний

$$C_3^0 + C_3^1 + C_3^2 + C_3^3 = 1 + 3 + 3 + 1.$$

Общее число сочетаний при $n=3$ равно 8, их символическая интерпретация дана в таблице 3, которая иллюстрирует различные комбинации формы, устройства и способа в трёхмерной модели объекта.

Информационную базу возможных состояний концепции составляет множество принципов (технологий) проектирования, адекватно объединяющее их цели. Начальное состояние концепции моделируется некоторым прототипом. Задача управления переходным процессом проектирования сводится к проблеме самообучения проектанта с определением необходимого числа опытов, составляющих многошаговую программу проектирования.

Следует отметить, что построение вариантов концепции подчиняется определённому порядку. Оно начинается с принципа действия Q , который является приоритетным, поскольку именно он следует из назначения объекта (например, решает задачу воздушного транспорта) и порождает полезный эффект. Далее рассматриваются альтернативы принципа формы F . И наконец, в рассмотрение включается принцип устройства V .

Как уже было отмечено, в проектном исследовании принципы, производящие концепцию, в терминах планирования экспериментов являются факторами, и их выбор должен основываться на независимости этих факторов друг от друга. Теория планирования экспериментов оперирует независимыми факторами, значения которых при описании объектовой системы S_0 задаются параметрически для сравнительной оценки соответствующих критериев целевой системы S_z . Независимость испытуемых факторов проявляется при планировании экспериментов как возможность управления значениями одних факторов без обусловленной связи с другими, т.е. независимо от значений других факторов объектовой системы S_0 . Выбор факторов проектантом основан на оценке чувствительности критериев целевой системы S_z к изменениям параметров объектовой системы S_0 , чтобы включить в план экспериментов ограниченное число n наиболее значимых факторов (задача факторного анализа). На рис. 29 приведены примеры типовых факторов планирования эксперимента.

Любой вариант из построенного множества концепций может принести успех для решения оптимальной задачи. Заранее это решение неизвестно и рассматривается как случайное событие в схеме повторных испытаний. Все

возможные сочетания принципов составят обучающий ряд концепций, включая прототип.

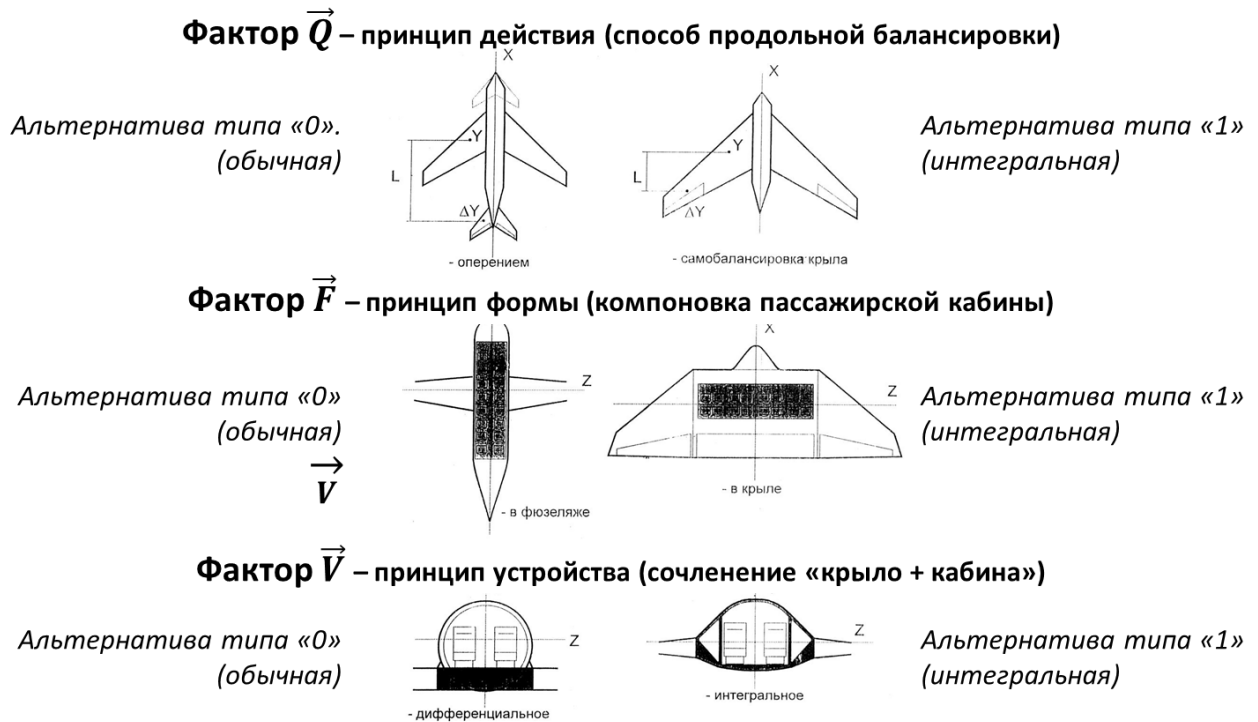


Рис. 29 – Типовые факторы планирования эксперимента

Следующим шагом после разработки всех вариантов летательного аппарата методами является сравнение расчётных вариантов концепции объекта с применением методов многодисциплинарного исследования. Выбор оптимального варианта осуществляется по критериям целевой системы (2.1). При проведении многодисциплинарного анализа характеристик вариантов их геометрические модели одновременно передаются специалистам по аэродинамике, системам управления и конструкции. Те работают одновременно, и результаты оценок каждого не зависят от расчётов других. При заданных требованиях к задаче (эффект, нагрузка) определяется система показателей, характеризующих потребные для этого ресурсы. На основании критериев оценки и отбираются наиболее предпочтительные варианты.

В результате описанного алгоритма преодолевается принципиальная неопределённость расчётной концепции, которая в дальнейшем становится предметом глубокого изучения.

Выводы по главе 3

Обосновано применение методов факторного анализа и планирования эксперимента для правильного решения поставленной задачи исследования.

Разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта, применяемый в соответствии с разработанной в ЦАГИ методологией концептуального проектирования. Эта методология рассматривает концепцию как сочетание принципов действия, устройства и формы – основных факторов модели разрабатываемого объекта. Показано, что задача оптимального проектирования на этапе анализа альтернатив соответствует алгоритму прямого поиска. Её решением является траектория поиска, ограничивающая выбор концепции.

Основными шагами разработанного метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта являются следующие:

- определение значимых для проекта факторов концепции (принципов),
- формирование проектных признаков на основе базы знаний,
- планирование полнофакторного эксперимента (число концепций – 2^n),
- формирование альтернативных вариантов концепции,
- сравнение расчётных вариантов концепции,
- выбор оптимального варианта по критериям целевой системы.

Проведение полнофакторного эксперимента позволяет построить перечень концепций, гарантированно содержащий наилучшее решение. Эксперимент проводится как испытание каждого варианта концепции в системе «затраты – нагрузка – эффект». Разработанный метод позволяет минимизировать риски неправильного выбора технической концепции.

4 Практическая реализация метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта

Разработанный метод неоднократно применён на практике. Среди задач, решённых с его использованием выделим следующие:

1. Выбор рационального типа силовой установки в компоновке с транспортным самолётом.
2. Применение метода управления качеством научной концепции в проекте «летающего крыла» сверхбольшой пассажировместимости.
3. Анализ возможных технических концепций самолёта для перспективного авиационного комплекса дальней авиации.
4. Обоснование эффективных принципов интеграции для дальнего магистрального самолёта гражданской авиации.
5. Анализ возможной концепции регионального транспортного самолёта.

В данном разделе рассмотрим несколько опубликованных примеров применения разработанной в диссертации методики.

4.1 Применение метода управления качеством научной концепции в проекте «летающего крыла» сверхбольшой пассажировместимости

Цель проекта состояла в поиске концепции самолёта типа «летающего крыла», обладающего большей эффективностью, чем самолёт традиционной компоновки.

Требования к проекту самолёта были составлены немецким подразделением Airbus. Основными из них являются следующие:

- дальность полёта 13700 км,
- пассажировместимость в трёх классах 750 чел.,
- потребная длина взлётно-посадочной полосы (ВПП) 3300 м,
- крейсерская скорость, соответствующая числу $M=0,85$.

Построение вариантов концепции подчиняется определённому порядку, описанному в разделе 2.3. Оно начинается с принципа действия (рис. 29), который является приоритетным, поскольку именно он следует из назначения объекта (например, решает задачу воздушного транспорта), порождает полезный эффект и связывает между собой внешние и инерционные нагрузки. В данном случае альтернативы принципа действия (Q) ищутся в способе аэродинамической балансировки самолёта во время полёта. При этом все разнообразие способов сводится к двум вариантам: самобалансировке крыла (не получившей распространение в транспортной авиации) и хорошо известной балансировке посредством оперения.

Далее для каждого из этих способов рассматриваются альтернативы принципа формы (F). Форма, будучи пограничным фактором, определяет, как величину, так и распределение **нагрузок** (воздушных и инерционных). Для транспортного самолёта, особенно большой пассажироместимости, ключевой является форма той части планера, которая вмещает полезную нагрузку. Как правило, пассажирскую (грузовую) кабину размещают в фюзеляже. Гипотетический вариант, требующий изучения, – это распределение полезной нагрузки по размаху крыла в его обитаемой части, в центроплане.

Наконец, в рассмотрение включается принцип устройства (V), который воплощает в себе множество элементов конструкции, используемых для восприятия всего спектра действующих нагрузок. Задача проектирования состоит в минимизации необходимых для этого материальных **ресурсов**, атрибутом которых может быть масса. Её решение ищется в особенностях сочленения элементов планера. Наиболее ответственной является конструкция консолей крыла в центральной части планера, где она испытывает действие максимального изгибающего момента. Нормой является дифференциальная конструкция, где нагрузки с одной консоли на другую передаются посредством кессона крыла, примыкающего к конструкции фюзеляжа. Новой может стать интегральная конструкция, в которой нагрузки передаются непосредственно через

формообразующую конструкцию обитаемого отсека. Такое устройство нуждается в изучении на гипотетических моделях концепции.

Поскольку исходя из постановки задачи требуется, чтобы этот самолёт был только «летающим крылом», то принцип действия – аэродинамическая балансировка – остаётся неизменной, выбирается балансировка крылом, нормальная схема не рассматривается. Таким образом, крылом расчётное число вариантов сократится, так как уменьшается сложность модели концептуального проектирования ($n = 2$). В результате множество расчётных вариантов «летающего крыла» может быть ограничено 4-мя концепциями, которых будет достаточно для определения рационального решения в классе новых.

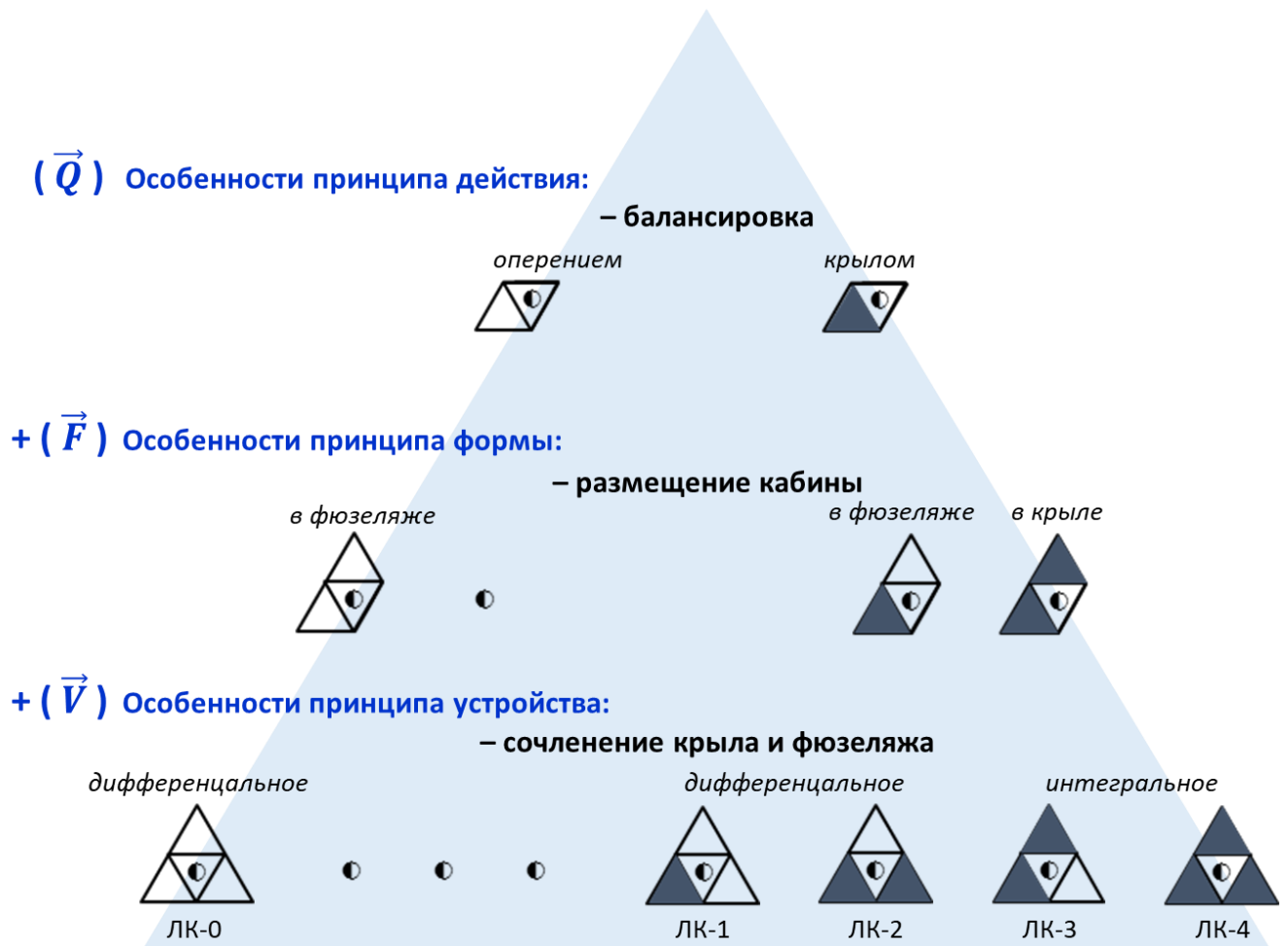
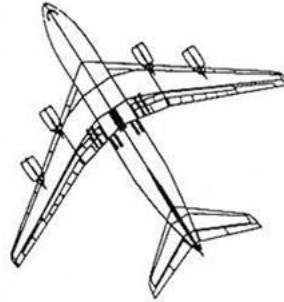


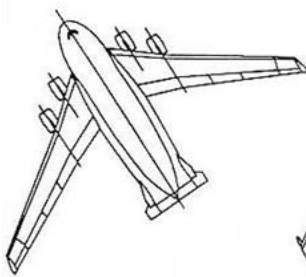
Рис. 30 – Модель концептуального проектирования «летающего крыла»

Любой вариант из построенного множества концепций может принести успех для решения оптимальной задачи. Заранее это неизвестно и рассматривается как случайное событие в схеме повторных испытаний. Все возможные сочетания принципов составят обучающий ряд концепций, включая прототип.

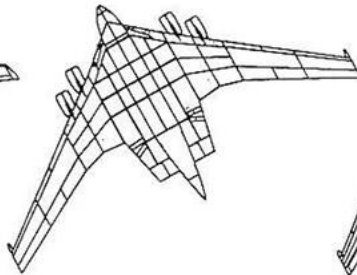
ЛК-0



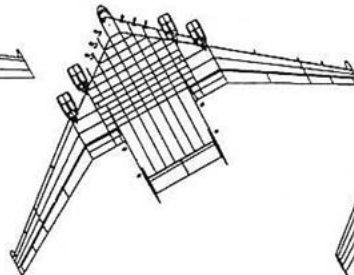
ЛК-1



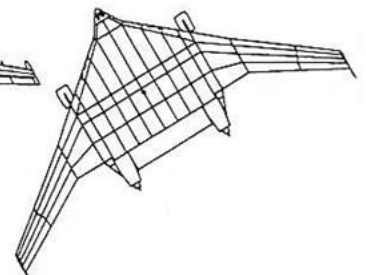
ЛК-2



ЛК-3



ЛК-4



ЛК-0 – Общий прототип. Традиционная компоновка нормальной схемы;
 ЛК-1 – с рулями на корме овального двухпалубного фюзеляжа;
 ЛК-2 – с центропланом и двухпалубным фюзеляжем; ЛК-3 – с двухпалубным центропланом; ЛК-4 – с однопалубным центропланом

Рис. 31 – Альтернативные концепции пассажирского «летающего крыла»

В этом ряду (рис. 31) особое место занимает частный прототип «летающего крыла» ЛК-1, который формально должен иметь наиболее близкую к известной форму планера, в частности, фюзеляж и типовое устройство его сочленения с крылом, например, низкоплан с кессоном в зоне фюзеляжа. Единственное, что может отличать его от традиционных концепций пассажирского самолёта, – это продольная балансировка способом «бесхвостка», т.е. его органы управления тангажом должны быть интегрированы с задними кромками элементов планера.

Несмотря на упрощение задачи ($n = 2$), следует признать, что объективно существует общий прототип ЛК-0 для новой концепции пассажирского самолёта,

который, как известно, не обладает никакими признаками интеграции. Это типичный транспортный самолёт с фюзеляжем и оперением для нормальной схемы аэродинамической балансировки. Включение общего прототипа в рассмотрение не может повлиять на выбор рациональной концепции «летающего крыла», поскольку находится вне траектории поиска, но это необходимо, чтобы предоставить исследователю полную информацию о целесообразности применения самолётов этого типа для пассажирской авиации и ответить на другой вопрос: что лучше, «летающее крыло» или обычная схема самолёта? Такое сравнение объединяет частное решение задачи концептуального проектирования «летающего крыла» с общей проблемой создания перспективного пассажирского самолёта. Таким образом, для успешного решения задачи концептуального проектирования «летающего крыла» в её приложении к перспективам развития пассажирской авиации целесообразно разработать $4+1=5$ вариантов самолёта, отвечающих одинаковым требованиям.

Дополнительным условием, гарантирующим отыскание рационального решения, является независимость проектных опытов. В данном случае к исследованию было привлечено 5 специалистов с различным личным опытом и идеями наилучшего решения задачи¹. Их одновременная и параллельная работа позволила разработать все 5 вариантов концепции ЛК до начала вычислительного эксперимента с оценкой ожидаемых характеристик. При проведении многодисциплинарного анализа характеристик вариантов их геометрические модели были одновременно переданы специалистам по аэродинамике, системам управления и конструкции. Те работали одновременно, и результаты оценок каждого не зависели от расчётов других, т.к. критериальные данные были получены только после комплексного анализа.

Методами многодисциплинарного исследования выполнен анализ разработанных альтернатив. При заданных требованиях к транспортной задаче

¹ Авторами включённых в рассмотрение схем самолёта являются сотрудники НИО-10 ЦАГИ Кажан В.Г., Гуревич В.И., Журихин Ю.П., Дунаевский А.И., Уджуху А.Ю. Разработка вариантов ЛК состоялась при выполнении проекта №548 МНТЦ.

определена система показателей, характеризующих потребности для этого ресурсы (рис. 32).

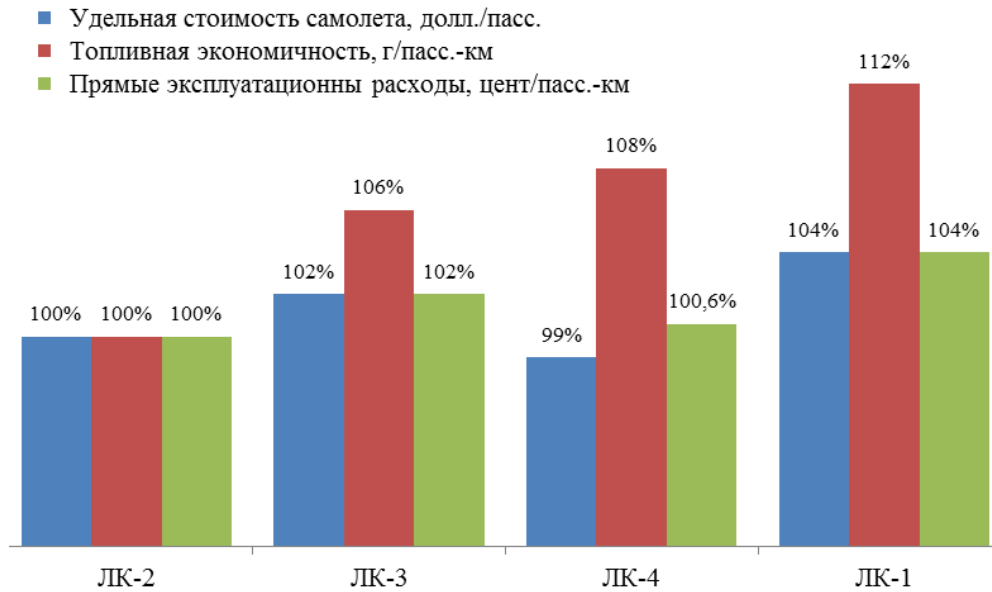


Рис. 32 – Основные показатели сравнения вариантов «летающего крыла»

Получено, что наибольшую эффективность может обеспечить концепция ЛК-2, сочетающая в себе следующие принципы:

- способ продольной аэродинамической балансировки по схеме «бесхвостка» с самобалансировкой крыла;
- форма планера обеспечивает размещение более половины пассажиров в коротком фюзеляже, а остальных – в толщине крыла;
- устройство планера предусматривает конструктивную интеграцию центроплана крыла с нижним салоном двухпалубного фюзеляжа.

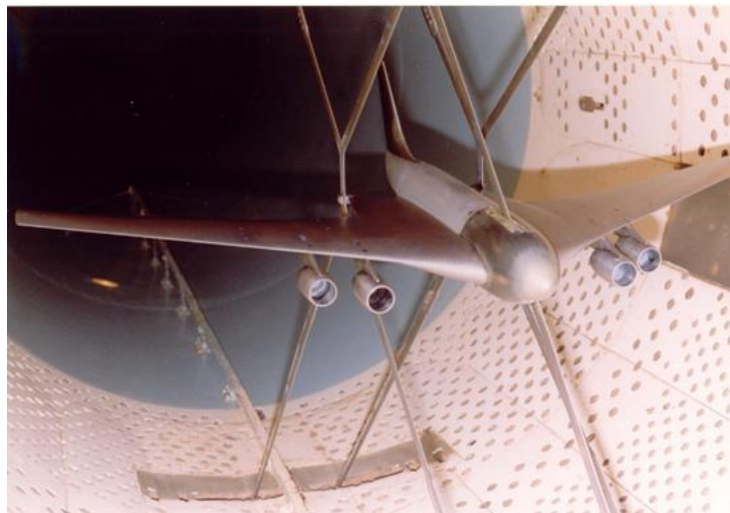


Рис. 33 – Модель «летающего крыла» (ЛК-2)

В результате теоретические и экспериментальные исследования позволили определить характеристики ЛК рассмотренной схемы, которое при сравнении с характеристиками самолёта традиционной схемы при одинаковых требованиях и техническом уровне имеет ряд преимуществ (таблица 6).

Таблица 6 – Преимущества характеристик «летающего крыла»

Взлётный вес	Меньше на 13,4%
Вес снаряжённого самолёта	Меньше на 6,4%
Тяга двигателя	Меньше на 12,7%
Аэродинамическое качество	Выше на 22%
Расход топлива на полет	Ниже на 25,5%
Стоимость самолёта	Ниже на 4,8%
ПЭР	Ниже на 7–9%

4.2 Обоснование эффективных принципов интеграции для дальнего магистрального самолёта гражданской авиации

Целью данного исследования являлось изучение возможности улучшения эксплуатационных характеристик гражданского самолёта посредством повышения степени двухконтурности двигателя, конструктивно-компоновочных мероприятий по изменению схемы двигателя и его интеграции с планером самолёта.

Рассмотрено три возможных направления инноваций:

1) применение турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) с увеличенной степенью двухконтурности (14–18 вместо 4–6) для уменьшения расхода топлива и шума на местности;

2) применение так называемой распределённой силовой установки (РСУ) с отдельными газогенератором и вентилятором, соединёнными механической трансмиссией;

3) интеграция элементов планера и силовой установки (СУ) ради полезных эффектов в аэродинамике, конструкции и получения новых эксплуатационных свойств.

В результате для формирования альтернативных вариантов были рассмотрены следующие факторы (таблица 7).

Таблица 7 – Факторы для формирования альтернатив

Факторы	Фактор «0»	Фактор «1»
1. Степень двухконтурности ТРДД	ТРДД ($m_0 = 4 \dots 6$) без редуктора	ТРДД ($m_0 = 14 \dots 18$) с редуктором
2. Степень интеграции элементов ТРДД	Обычный ТРДД: вентилятор и газогенератор в соосной конструкции	Нетрадиционная РСУ: вентилятор и газогенератор разделены трансмиссией
3. Степень интеграции планера и силовой установки	Обычный самолёт: ТРДД на пилонах снизу перед крылом	Нетрадиционный самолёт: ТРДД/РСУ включены в элементы планера с полезными эффектами в аэродинамике, конструкции, силовой установке

В соответствии с этими независимыми принципами с использованием разработанного метода управления качеством научной концепции на начальных этапах проекта составлен ряд возможных конфигураций дальнего магистрального самолёта (ДМС), которые отличаются разными сочетаниями степени двухконтурности, схемами ТРДД и приёмами интеграции элементов в системе «планер + двигатель». Выполнена многодисциплинарная экспертная оценка вариантов компоновки самолёта, которая стала основанием для выбора наиболее эффективных концепций.

Объектами исследования стали принципы интеграции элементов СУ с крылом и фюзеляжем и другие инновации. Вопросы интеграции рассмотрены с учётом научно-технического прогресса в гражданском двигателестроении,

который сопровождается заметным увеличением степени двухконтурности m_0 ТРДД – от 4-6 для современных двигателей до 14-18 в перспективе. Этот процесс сопровождается увеличением поперечных размеров ТРДД (из-за уменьшения удельной тяги), что препятствует их интеграции с крылом и фюзеляжем.

Выход видится в дезинтеграции (разделении на движитель и газогенератор) ТРДД сверхбольшой степени двухконтурности с целью уменьшения единичных размеров модулей (вентилятора, газогенератора) и габаритов РСУ в целом. При этом возникают новые условия для интеграции с планером СУ.

Независимые факторы сравнительного анализа приведены на рис. 34 – 36.

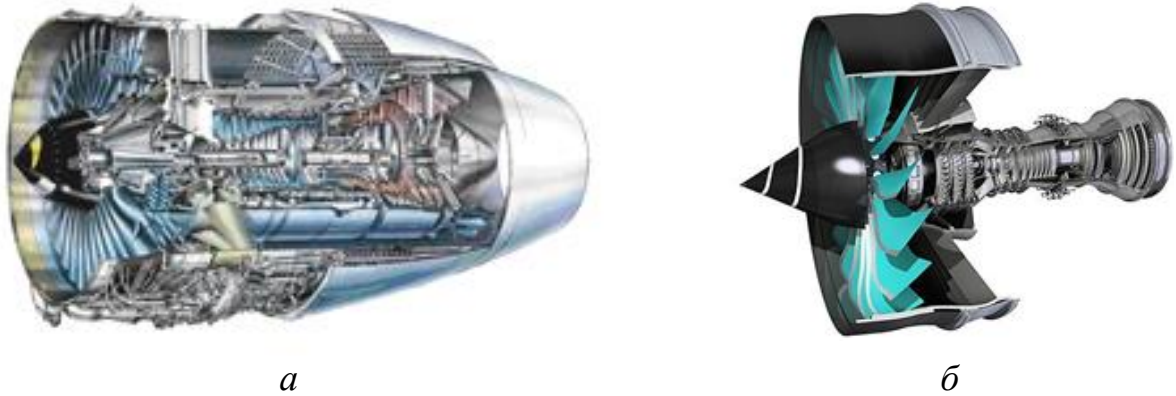


Рис. 34 – Фактор 1 (разная степень двухконтурности ТРДД):
a – ТРДД_{СМ} ($m = 4 \dots 6$); *б* – ТРДД_Р ($m = 14 \dots 16$)

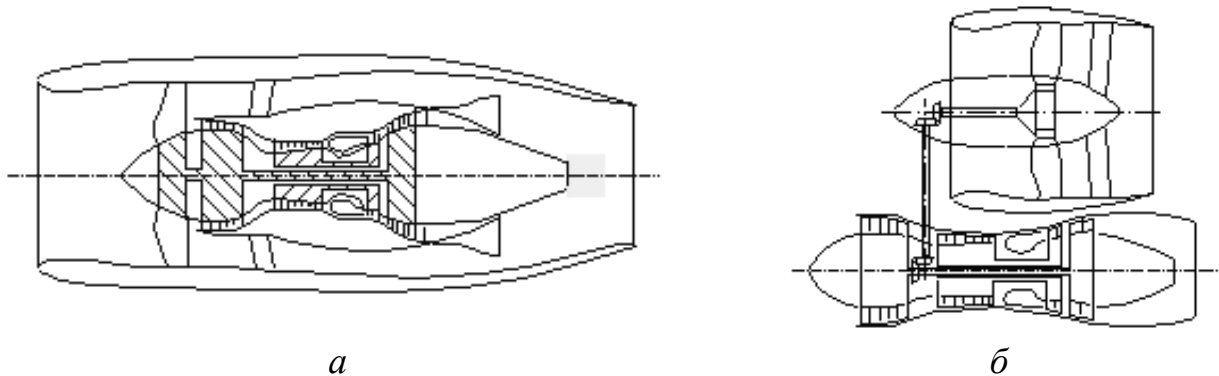


Рис. 35 – Фактор 2 (разная степень интеграции элементов двигателя):
a – ТРДД_{СМ} ($m = 4 \dots 6$); *б* – РСУ ($m = 14 \dots 16$)

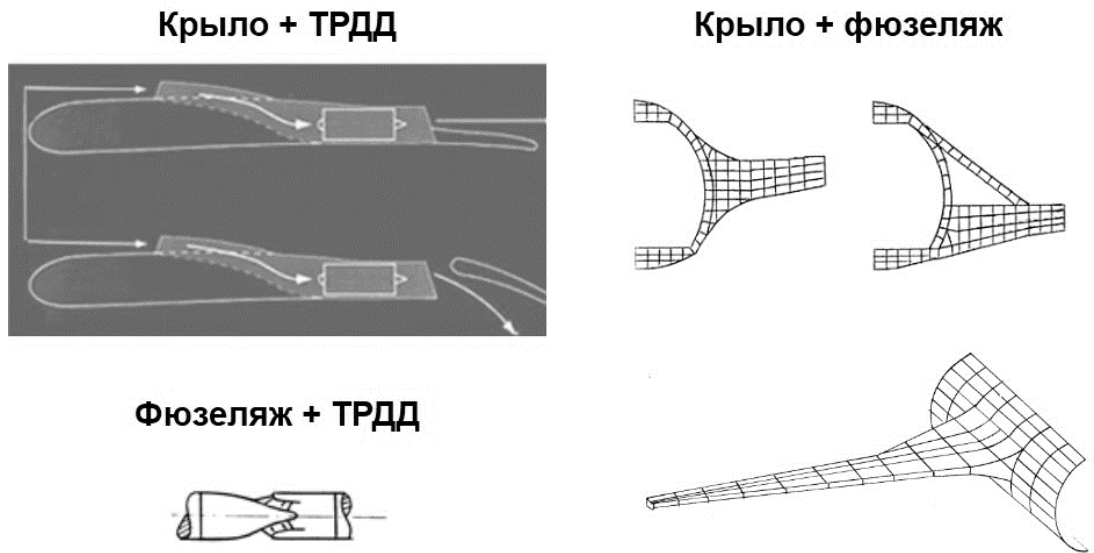


Рис. 36 – Фактор 3 (элементы интеграции планера и силовой установки)

В соответствии с разработанным методом управления качества научной концепции на начальном этапе проекта были сформированы 8 альтернативных вариантов (рис. 37).

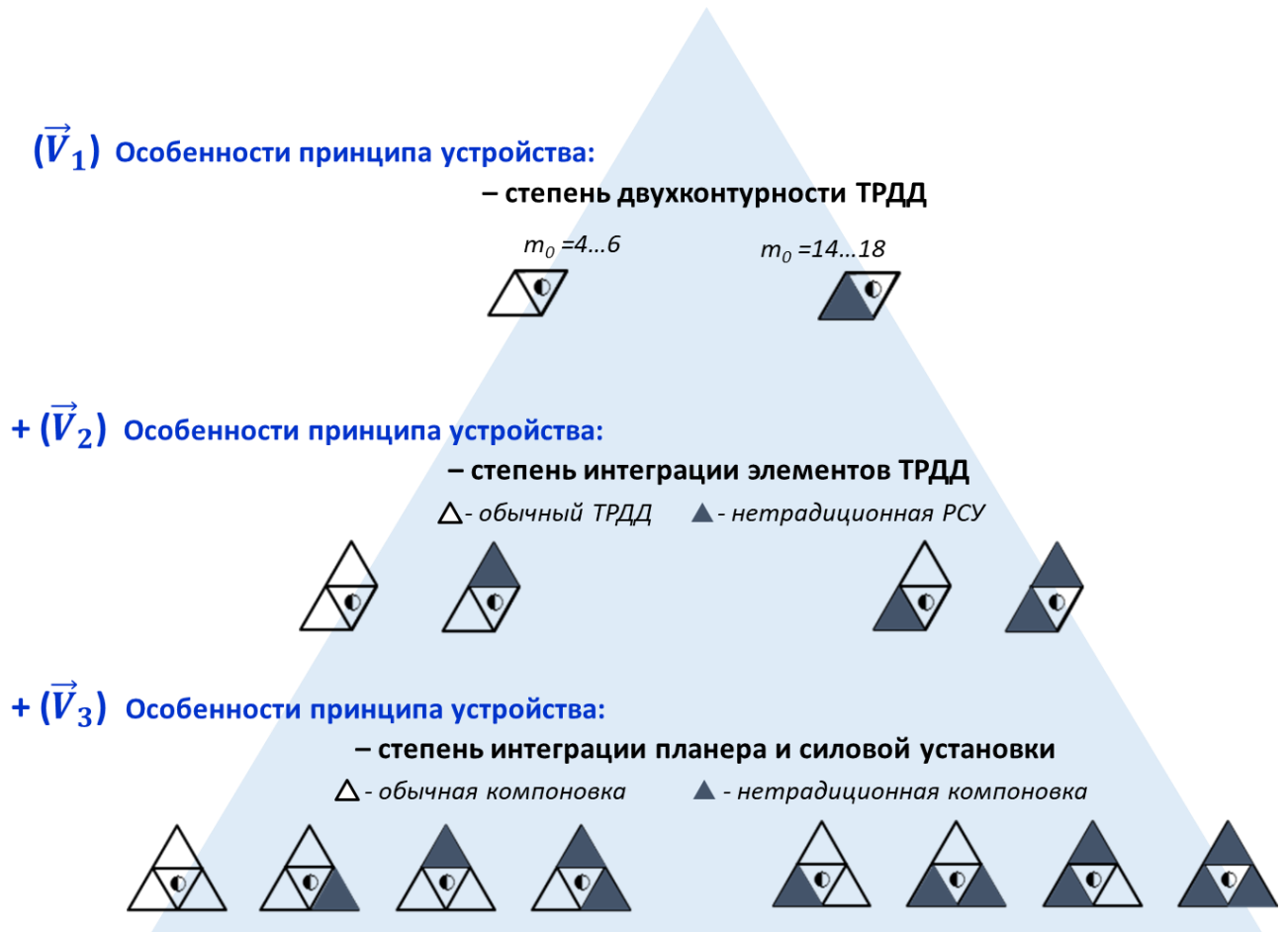


Рис. 37 – Модель концептуального проектирования дальнего магистрального самолёта гражданской авиации

Исследование проведено на примере дальнего магистрального самолёта, предназначенного для перевозки 200 пассажиров на дальность около 11000 км со скоростью, соответствующей $M=0,82$.² Базовый вариант самолёта ИПД-0 (рис. 29) имеет традиционную конструкцию и компоновку. Силовая установка включает в себя два ТРДД умеренной степени двухконтурности со стартовой тягой 21,4 т. Мотогондолы двигателей размещены на пилонах под крылом. Крыло в схеме «низкоплан» имеет площадь 246 м² и размах 48,3 м.

Вариант ИПД-1 разработан, чтобы обеспечить размещение на самолёте двигателя сверхбольшой двухконтурности на пилонах под крылом в распространённой схеме «высокоплан». В этом случае возможно применение двигателей увеличенных габаритов (диаметр мотогондолы $D_{\text{мг}} \approx 3,5$ м вместо $D_{\text{мг}} \approx 2,7$ м для двигателя умеренной двухконтурности). Стартовая тяга двигателей самолёта увеличена до 24,3 т в связи с необходимостью сохранить среднюю тягу двигателей на разбеге при увеличении степени двухконтурности двигателей от $m_0=5$ до $m_0=16$. Отмеченные различия в тяге сохраняются и для вариантов РСУ с такой же степенью двухконтурности, включённых в состав других концепций. Количество возможных концепций интегрального самолёта, включая базовый вариант, в соответствии с методикой проведения полнофакторного эксперимента соответствует числу сочетаний трёх факторов $2^3=8$. В результате на основе полученных логических моделях (рис. 31) были разработаны проекты ДМС (рис. 38).

² Разработка вариантов самолёта выполнена сотрудниками НИО-10 ЦАГИ, в числе которых Скворцов Е.Б., Гуревич Б.И., Бондарев А.В., Чанов М.Н.

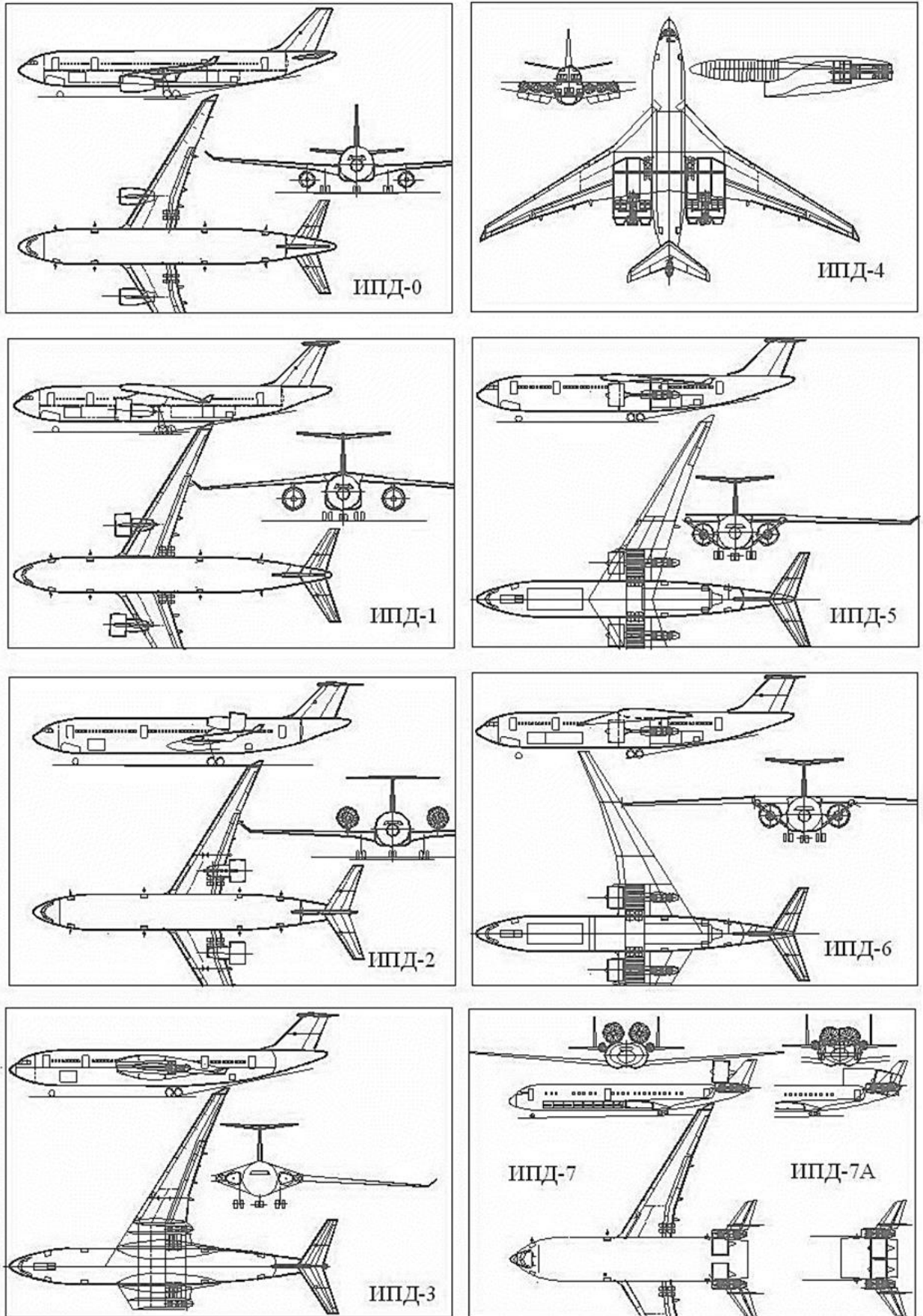


Рис. 38 – Разработанные варианты концепции

Таблица 8 – Основные параметры разработанных вариантов концепции ДМС

Вариант	ИПД-0	ИПД-1	ИПД-2	ИПД-3	ИПД-4	ИПД-5	ИПД-6	ИПД-7, 7А
Крыло	Низкоплан	Высокоплан	Низкоплан	Среднеплан	Среднеплан	Высокоплан с подкосом	Высокоплан обратной стрел. с подкосом	Низкоплан
Оперение	Палубное	Т-образное	Т-образное	Т-образное	Палубное	Т-образное	Т-образное	Двухкилевое палубное
Мотогондола	Под крылом на пилонах	Под крылом на пилонах	Над крылом на пилонах	В толщине крыла	В толщине крыла	На подкосе крыла	На подкосе крыла	На хвосте фюзеляжа
Двигатель	ТРДД	ТРДД	ТРДД	РСУ	РСУ	РСУ	РСУ	РСУ
Тяга, т	2×21.4	2×24.3	2×24.3	2×21.4	2×24.3	2×24.3	2×24.3	2×24.3
Степень двухконтурности	4-6	14-18	14-18	4-6	14-18	14-18	14-18	14-18
Размах крыла, м	48.27	48.27	48.27	56.5	60.33	58.6	58.6	49.5
Площадь крыла, м ²	246	246	246	345	386	328	362	255
Удлинение крыла	9.47	9.47	9.47	9.25	9.4	10.47	9.5	9.61
Диаметр фюзеляжа, м	5.64	5.64	5.64	5.64	5×6.3	5.64	5.64	6.85×4.15
Отн.мидель фюзеляжа	0.1	0.1	0.1	0.072	0.062	0.076	0.069	0.091
Омываемая поверхность, м ²	1370	1357	1390	1390	1470	1670	1770	1350

Снижение удельного расхода топлива ТРДД обеспечивается путем повышения эффективного коэффициента полезного действия (КПД) термодинамического цикла и полётного КПД двигателя. Повышение КПД термодинамического цикла достигается повышением параметров рабочего процесса (суммарной степени повышения давления в компрессоре и температуры газа перед турбиной), реализуемых разработкой новых технологий, материалов, способов эффективного охлаждения «горячей» части, и ведёт к созданию нового поколения двигателей.

Для рассмотренных вариантов ИПД ДМС (см. рис. 38) проведён анализ газодинамического совершенства воздухозаборников (ВЗ) и реактивных сопел (РС), получены эффективные тягово-экономические и весовые характеристики СУ. Суммарное изменение удельного расхода топлива в крейсерском полете показано на рис. 39.

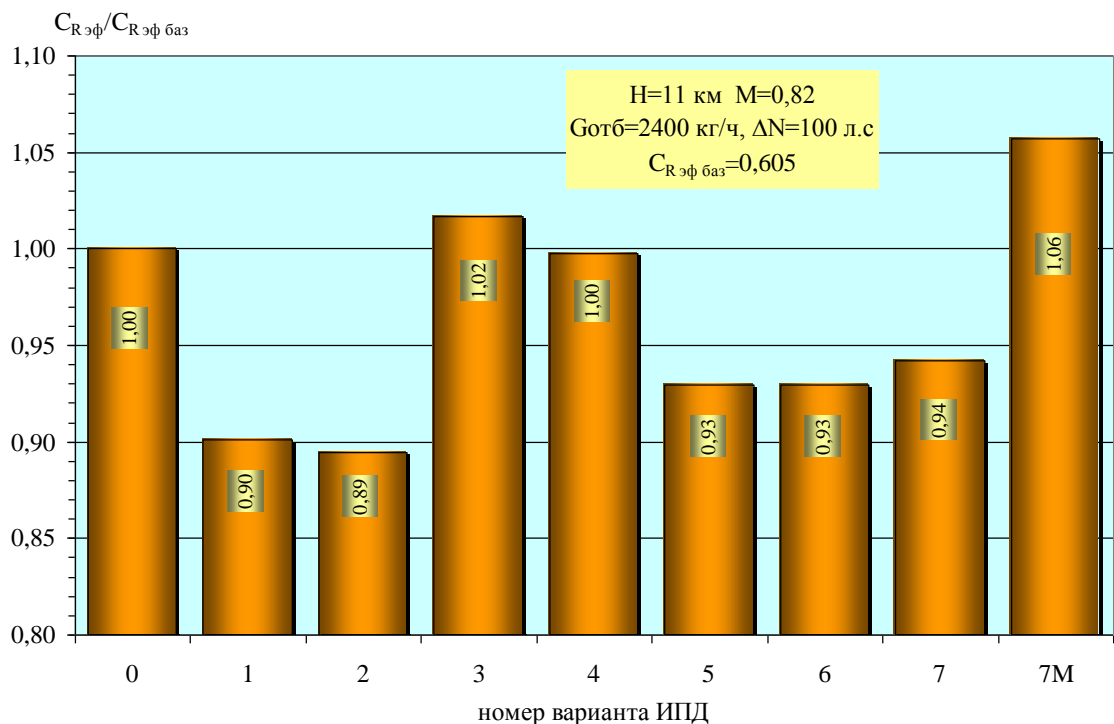


Рис. 39 – Изменение эффективного удельного расхода топлива в сравнении с базовой схемой ($C_{Rэф}/C_{Rэф баз}=1,00$)

Также был произведён весовой анализ силовой установки. Результаты расчётов приведены на рис. 40.

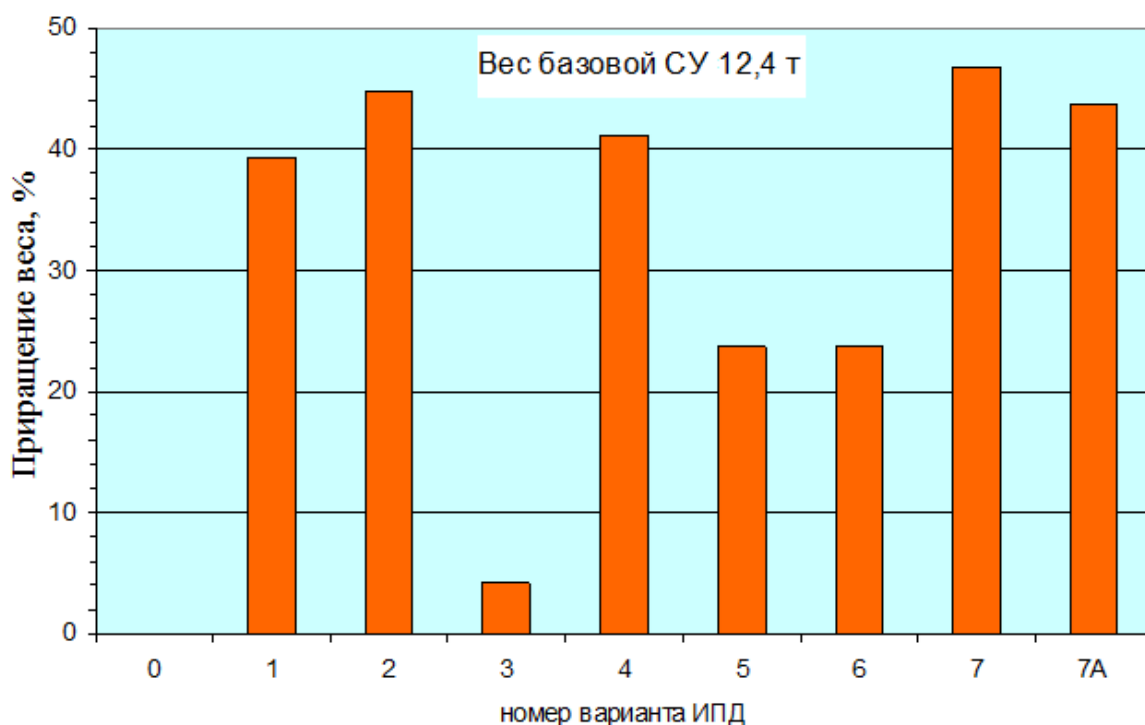


Рис. 40 – Приращение веса силовой установки в сравнении с базовой схемой

Непосредственный расчёт аэродинамических характеристик рассматриваемых вариантов был затруднён из-за отсутствия геометрических данных, соответствующих оптимизированным аэродинамическим компоновкам. В данной работе для оценки возможных аэродинамических характеристик сравниваемых компоновок был принят подход, который основан на экспертных оценках дополнительных издержек ΔC_x в аэродинамическом сопротивлении самолёта по сравнению с «идеальной» полярой.

Проведённое выше междисциплинарное исследование служит для выбора перспективных концепций интеграции планера и двигателей (ИПД). Расчётные оценки вариантов ИПД выполнены при одинаковых условиях сравнения, а именно:

- варианты самолёта выполняют одинаковую транспортную задачу, включая принятую дальность полёта и пассажиропместимость;
- площадь крыла и тяга двигателей в данном случае не оптимизируются, а выбираются в соответствии с отличительными признаками варианта ИПД;
- число расчётных вариантов ИПД ограничивается по результатам экспертной оценки технических и эксплуатационных характеристик;
- выбранные концепции ИПД служат для дальнейшей оптимизации параметров и расчётно-экспериментального исследования критических технологий.

Основные результаты анализа вариантов ИПД приведены в таблицах 9–11.

Таблица 9 – Сравнение расчётных вариантов по топливной эффективности

Вариант ИПД	0	1	2	3	4	5	6	7	7А
1. Технические характеристики:									
- макс. аэродинамическое качество	18,6	18,2	18,3	19,9	18,9	17,7	19,0	18,2	
- эфф. уд. расход топлива, кг/кгс·ч	0,605	0,545	0,541	0,612	0,593	0,562	0,562	0,57	0,639
- изменение веса снаряжённого самолёта, т	0	+4,9	+5,4	-032	+2,45	+1,65	+1,87	+3,21	
2. Изменение топливной эффективности в зависимости от:									
- макс. аэродинамического качества	1,0	1,0220	1,0164	0,9347	0,9841	1,0508	0,9789	1,0220	
- эфф. уд. расхода топлива	1,0	0,901	0,894	1,012	0980	0,929	0,929	0,942	1,057
- веса снаряжённого самолёта	1,0	1,0561	1,0677	0,9963	1,0280	1,0189	1,0214	1,0367	
3. Изменение топливной эффективности	1,0	0,972	0,97	0,942	0,991	0,995	0,929	0,998	

Таблица 10 – Преимущества интеграции: качественное сравнение расчётных вариантов по техническим характеристикам

Вариант ИПД	0	1	2	3	4	5	6	7	7А
1. Аэродинамика				++	+		+		
2. Экономичность силовой установки		+	+			+	+		
3. Вес: - конструкции - силовой установки				+	++	+	+	++	++
4 Топливная эффективность самолёта			+	++			++		

Таблица 11 – Преимущества интеграции: качественное сравнение расчётных вариантов по эксплуатационным характеристикам

Вариант ИПД	0	1	2	3	4	5	6	7	7А
1. Расход топлива	+		+	++			++		
2. Экология/шум			+	++	+			+	+
3. Безопасность эксплуатации: - управляемость на малых скоростях полёта - посадка на воду - инжекция посторонних предметов			++	+	+		+		
			+	+		+	+	+	+
		+	++	+		+	+	++	++
Общая оценка	1	1	7	7	2	2	5	4	4

Сравнение эксплуатационных характеристик показало, что некоторые из числа рассмотренных вариантов ИПД даже без оптимизации имеют потенциал значительного – на 6÷8% – уменьшения расхода топлива в сравнении с традиционной конфигурацией ДМС. Результаты исследования позволили рекомендовать для дальнейшего изучения следующие концепции:

ИПД-2 (рис. 41). Силовая установка включает ТРДД с увеличенной степенью двухконтурности ($m_0 = 14-18$) и задним расположением вентилятора. Мотогондолы установлены над крылом у задней кромки.

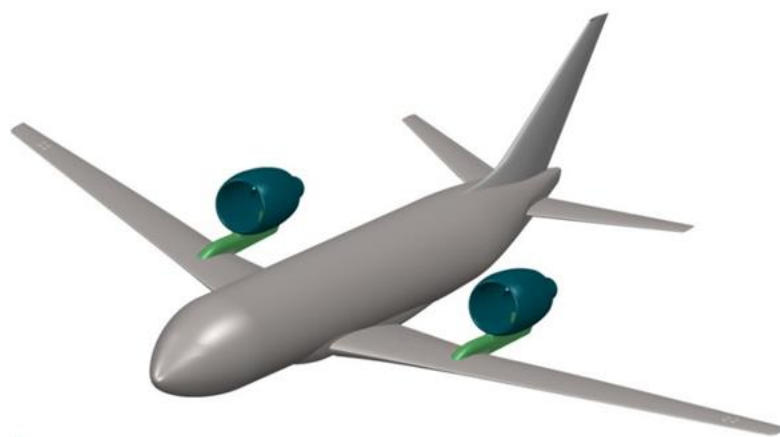


Рис. 41 – Вариант ИПД-2

В таком варианте отсутствуют ограничения на применение экономичных ТРДД сверхбольшой двухконтурности, шум от вентиляторов экранируется крылом и фюзеляжем, существенно улучшена управляемость при использовании ОВТ.

ИПД-3 (рис. 42). Отличается размещением ТРДД в корневой части крыла, которая выполняет также функции мотогондолы. Эта интегральная конструкция позволяет увеличить размах крыла практически без увеличения его веса. Основными эффектами интеграции являются аэродинамические: уменьшение индуктивного сопротивления и «струйный» эффект проточного течения через двумерный воздухозаборник в передней кромке крыла. Наиболее благоприятные возможности для интеграции создаёт применение РСУ с вентилятором и генератором, связанными трансмиссией. Длинные каналы СУ создают благоприятные возможности для существенного снижения шума на местности.



Рис. 42 – Вариант ИПД-3

В настоящее время ведётся экспериментальное исследование рекомендованных конфигураций для доказательства их технической осуществимости.

4.3 Анализ возможной концепции регионального транспортного самолёта

Целью данной работы являлся научно обоснованный выбор технической концепции многофункционального регионального самолёта транспортной категории (РТС), создание которого возможно к 2035 г.

Эксплуатационные требования к многоцелевому РТС:

1. Максимальная нагрузка класса 83÷120 пассажиров или 8÷12 т груза.
2. Нормальная нагрузка класса 57÷83 пассажиров или 6÷8 т груза.
3. С максимальной нагрузкой дальность полёта класса 2900÷4650 км при базировании на ВПП длиной не более 1800 м.
4. С нормальной нагрузкой дальность полёта класса 1800÷2900 км при базировании на ВПП длиной не более 1300 м.
5. Воздушное / посадочное десантирование максимальной нагрузки в полёте по маршруту на дальность 3700км при взлёте с ВПП длиной не более 1800 м.
6. Воздушное десантирование моногруза весом до $\frac{1}{2}$ максимальной нагрузки.
7. При взлёте с ВПП длиной не более 1800м промежуточная посадка на грунтовую площадку длиной 600м с десантированием максимальной нагрузки и возвращением без груза.
8. Допустимая прочность покрытия ВПП не более 5÷6 кг/см² при движении по грунтовой площадке.
9. Условия комфорта для пассажиров не должны уступать узкофюзеляжным магистральным самолётам.
10. Номенклатура полезной нагрузки должна включать большинство средств для перевозки массовых генеральных грузов, включая тяжёлые контейнеры.

Исходя из постановки задачи были выбраны следующие основные факторы (таблица 12).

Таблица 12 – Независимые факторы формирования альтернативных систем РТС

S₀	Независимые факторы	Фактор типа «0»	Фактор типа «1»
Q	Способ аэродинамической балансировки	Аэродинамическая балансировка оперением (нормальная схема)	Аэродинамическая балансировка оперением (нормальная схема)
F	Аэродинамическая форма планера и силовой установки	Дифференциальная (обычная)	Интегральная
V₁	Грузовое устройство для контакта с вертолётom	Независимое (обычное)	Сопряжённое
V₂	Устройство конструкции планера и силовой установки	Дифференциальное (обычное)	Интегральное

Независимые факторы: F, V₁, V₂

Степень сложности эксперимента n=3

Число альтернатив 2ⁿ=8

Прототип – схема «высокоплан».

Научно-технический задел в проектировании региональных пассажирских самолётов (Ту-334, Ан-148 и SSJ-100), а также проектные представления об обычной концепции транспортного самолёта (рис. 43), выполненного в схеме «высокоплан», полностью характеризуют проектные признаки типа «0», указывающие на отсутствие новизны.

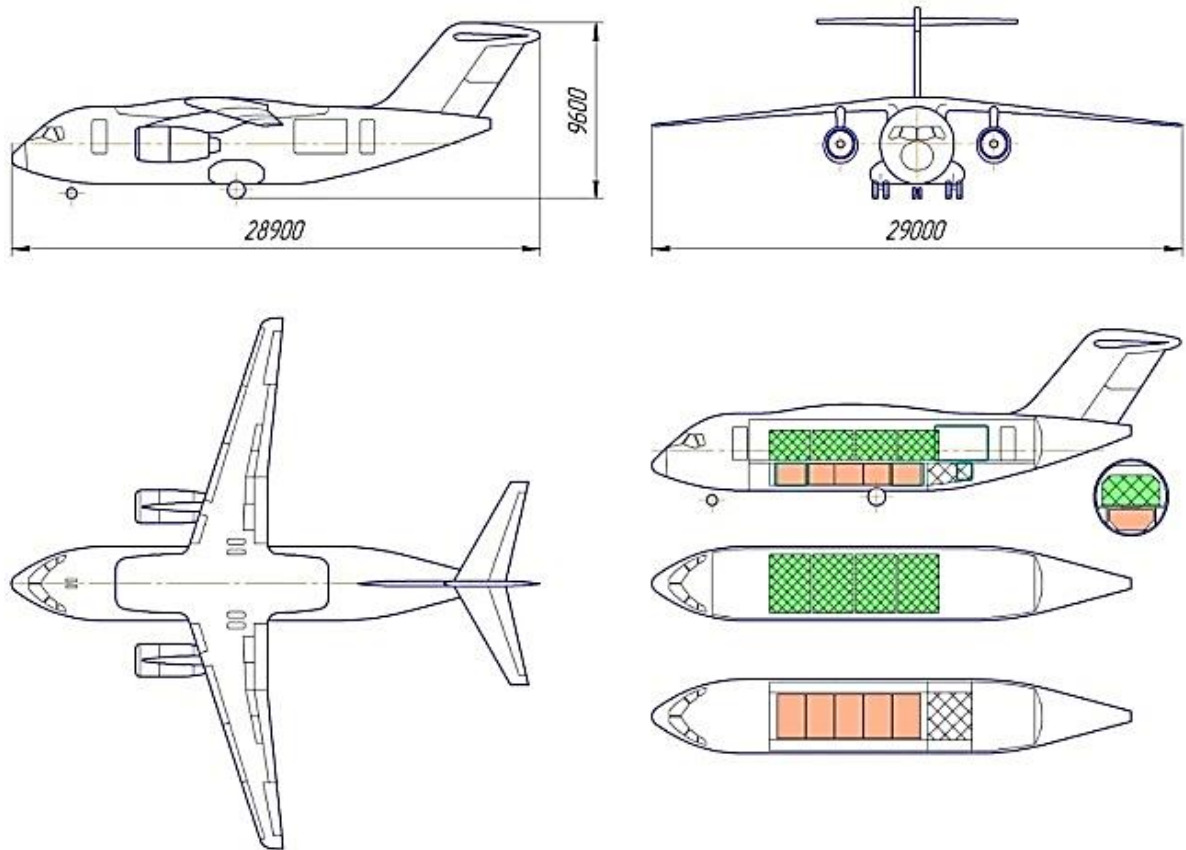


Рис. 43 – Прототип («высокоплан»)

Факторы типа «1» (таблица 13) – это ранее не применявшиеся при разработке транспортных самолётов проектные факторы, использующие методы и средства интеграции элементов самолёта.

Некоторые проектные признаки, которые могут быть применены при формировании проектных вариантов, приведены в таблице 13. Именно они могут рассматриваться в качестве возможных элементов объектовой системы S_0 для воплощения в концептуальном проекте с указанным в таблице 13 полезным эффектом, который будет характеризовать целевую систему S_z проекта.

В соответствии с разработанным методом управления качеством научной концепции на начальном этапе проекта были сформированы 8 альтернативных вариантов (рис. 44).

Таблица 13 – Проектные признаки факторов типа «1»

S ₀	Независимые факторы	Некоторые проектные признаки	Полезные эффекты
Q	Способ аэродинамической балансировки	Интегрированное хвостовое оперение или схема «бесхвостка»	Аэродинамическая устойчивость и управляемость самолёта по тангажу, рысканию и крену
F	Аэродинамическая форма планера и силовой установки	Увеличенный размах крыла, малая поверхность трения, большая хорда, развитый центроплан или наплыв крыла для интеграции с фюзеляжем и силовой установкой, отсутствие пилонов, мотогондол и обтекателей шасси	Безопасность от сваливания, малое аэродинамическое сопротивление, увеличенная скорость полёта, увеличенные несущие свойства, положительная аэродинамическая интерференция, «струйный» эффект (возможно синергетическое улучшение конструкции)
V	Устройство конструкции планера и силовой установки	Большая строительная высота лонжеронов (относительная толщина) крыла, подкосы крыла, малый размах и стреловидность крыла, уменьшенная поверхность обшивки	Безопасность от разрушения, облегчённая конструкция, повышенная прочность и жёсткость (возможно синергетическое улучшение аэродинамики)

(\vec{F}) Особенности принципа формы:

– аэродинамическая форма планера
и силовой установки

дифференциальная



интегральная



+ (\vec{V}_1) Особенности принципа устройства:

– грузовое устройство для контакта с вертолетом

независимое



сопряженное



независимое



сопряженное



+ (\vec{V}_2) Особенности принципа устройства:

– устройство конструкции планера и силовой установки

дифференциальное



интегральное



Рис. 44 – Модель концептуального проектирования РТС

Результат сочетания факторов представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты сочетания факторов

Вариант №	F	V ₁	V ₂	Прототип
0	0	0	0	Прототип РТС-0 + ОБТ
1	1	0	0	Без прототипа с РСУ
2	0	1	0	Без прототипа с новой кормой
3	0	0	1	Вариант типа ИПД-2
4	1	1	0	Без прототипа с новой кормой
5	1	0	1	Вариант типа ИПД-3 с РСУ
6	0	1	1	На основе РТС-3 с новой кормой
7	1	1	1	Вариант типа МДС-2 с новой кормой

Следующим шагом в соответствии с методом являлся переход от полученных логических моделей к проектам регионального транспортного самолёта (рис. 45).³

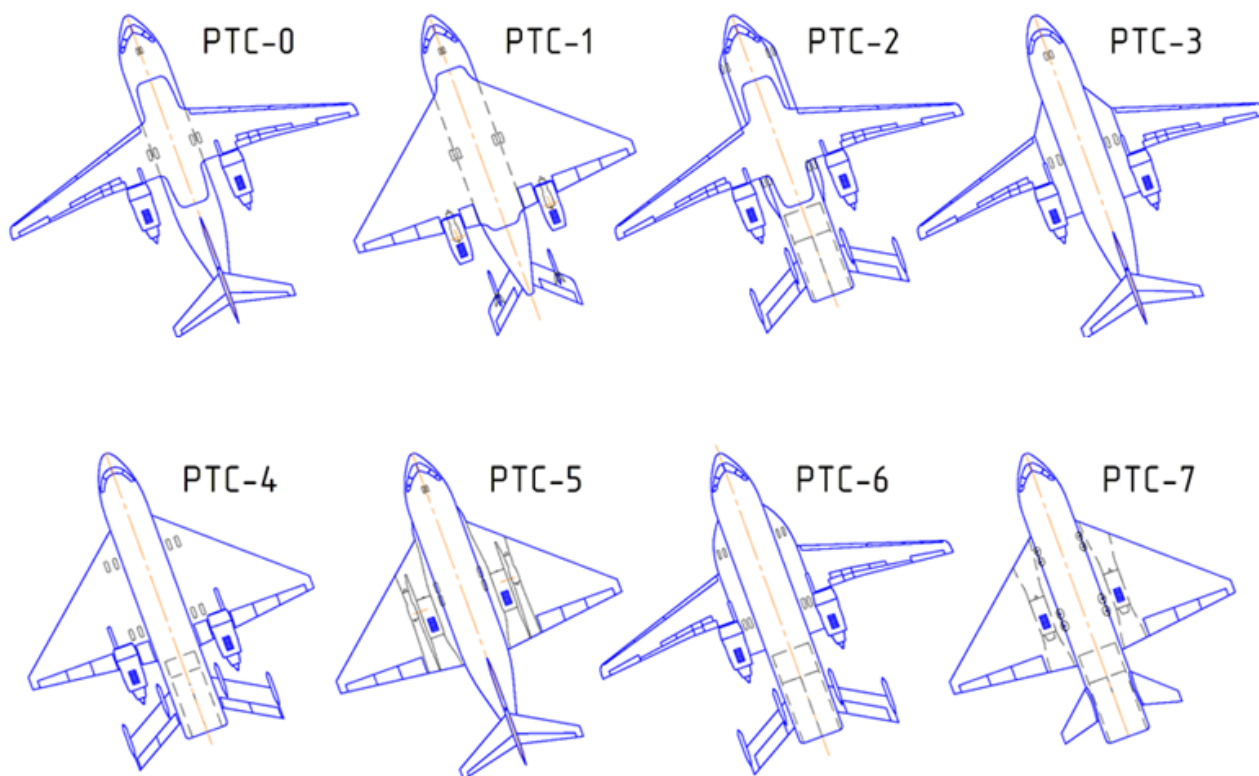


Рис. 45 – Разработанные варианты концепции РТС

После разработки всех вариантов был выполнен анализ альтернатив с применением методов междисциплинарного исследования. Выбор оптимального варианта осуществляется по критериям целевой системы. При проведении междисциплинарного анализа характеристик вариантов их геометрические модели были переданы специалистам по аэродинамике, системам управления и конструкции, расчёты осуществлялись независимо. При заданных требованиях к задаче (эффект, нагрузка) определялась система показателей, характеризующих потребные для этого ресурсы.

На рис. 46 приведены диаграммы по основным техническим характеристикам: вес планера, силовой установки, удельного расхода топлива и

³ Разработка проектов выполнена сотрудниками НИО-10 ЦАГИ, в числе которых Бондарев А.В., Васин С.С., Коноплева В.М., Скворцов Е.Б., Чанов М.Н.

аэродинамического параметра. Получено, что при запасе топлива, ограниченном максимальной нагрузкой, преимущество в дальности полёта обеспечивает меньший вес снаряжённого самолёта, характерный для вариантов РТС-5, РТС-7. Однако при ограниченном весе полезной нагрузки преимущество в дальности полёта переходит к вариантам РТС-0, РТС-3 с наибольшим аэродинамическим качеством.

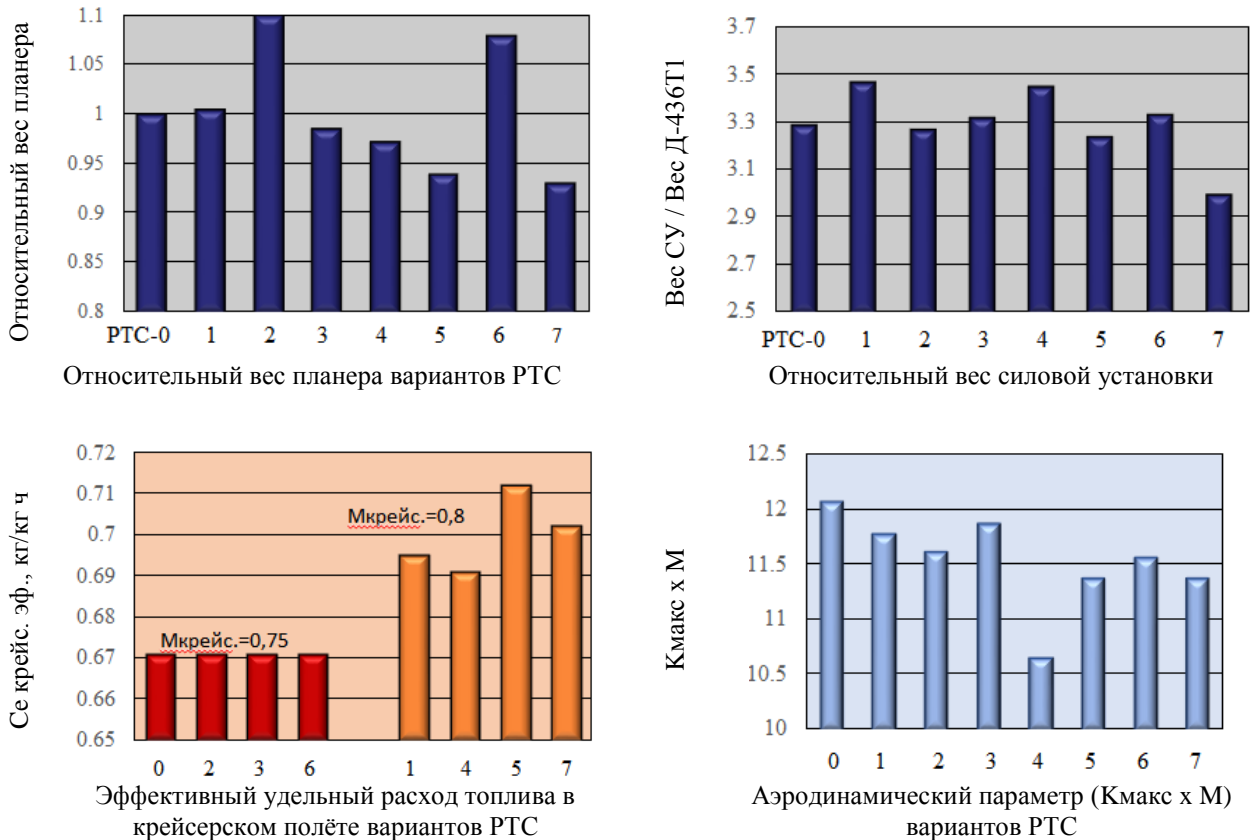


Рис. 46 – Результаты многодисциплинарных исследований

В таблицах 14 и 15 приведены рассчитанные лётно-технические и технико-экономические характеристики вариантов РТС.

Таблица 14 – Лётно-технические характеристики вариантов РТС

Характеристики	Варианты РТС							
	0	1	2	3	4	5	6	7
М крейсерского полета	0,75	0,8	0,75	0,75	0,8	0,8	0,75	0,8
Скорость крейсерского полёта, км/ч	800	850	800	800	850	850	800	850
Расход топлива C_e неуст., кг/кг·ч	0,64	0,66	0,64	0,64	0,66	0,66	0,64	0,66
Расход топлива C_e крейс. эффект., кг/кг·ч	0,671	0,695	0,671	0,671	0,691	0,712	0,671	0,702
Аэродинамическое качество $K_{\text{макс}}$.	16,080	14,700	15,470	15,800	13,300	14,200	15,400	14,200
Аэродинамическое качество $K_{\text{крейс}}$.	14,710	13,610	14,630	14,990	10,880	13,530	14,520	13,7
Техническая дальность полёта $L_{\text{техн.}}$, км	2850	2530	2106	2950	2260	2990	2210	3350
Аэронавигационный запас топлива, т	2,388	2,635	2,436	2,406	2,904	2,717	2,455	2,733
Практическая дальность полёта $L_{\text{пр.}}$, км	1870	1526	1170	1950	1350	1970	1270	2280

Таблица 15 – Технико-экономические характеристики вариантов РТС

Характеристики	Варианты РТС							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Максимальная транспортная производительность, пасс. × км/ч	80000	85000	80000	80000	85000	85000	80000	85000
Максимальная транспортная производительность, т × км/ч	9600	10200	9600	9600	10200	10200	9600	10200
Топливная эффективность, г / пасс. × км	26	27,5	27,0	25,6	33	27,6	27,0	26,8
Топливная эффективность, г / т × км	228	240	238	223	285	240	237	232
Удельный вес снаряжённого самолёта, т / т груза	2,43	2,45	2,56	2,41	2,41	2,34	2,54	2,3
Удельный вес снаряжённого самолёта, т / пасс.	0,29	0,29	0,31	0,29	0,29	0,28	0,3	0,28

Все варианты имели компоновочные особенности, позволяющие уменьшить шум на местности методом экранирования. Для определения возможного вклада технических концепций и соответствующих технологий в основные направления развития авиации нового поколения и возможные области применения транспортного самолёта была проведена экспертная оценка всех вариантов самолёта (таблица 16).

Таблица 16 – Экспертная оценка технологий

Варианты РТС	0	1	2	3	4	5	6	7
1. Безопасность полётов: - управляемость на малых скоростях	+	+	+	+	+	+	+	+
2. Экология: - шум на местности	+	+	+	+	+	+++	+	+++
3. Ресурсосбережение: - расход топлива - масса материалов	+			+			+	+
4. Транспортная доступность - дальность полёта - трансп. производительность - согласов-ть с вертолёт-ом в АТК	+			+		+		+
5. Потенциал военного применения: - для перевозки грузов - для патрулирования - для спец. операций	+	+	+	+	+	+	+	+
ОБЩАЯ ОЦЕНКА	6	4	4	6	5	8	4	10

Многодисциплинарное сравнение вариантов РТС показало, что наименьшим весом самолёта и наибольшей скоростью полёта характеризуются варианты с

большой степенью интеграции планера и двигателей (например, РТС-7), оснащённые широкохордным крылом малого удлинения (рис. 47).

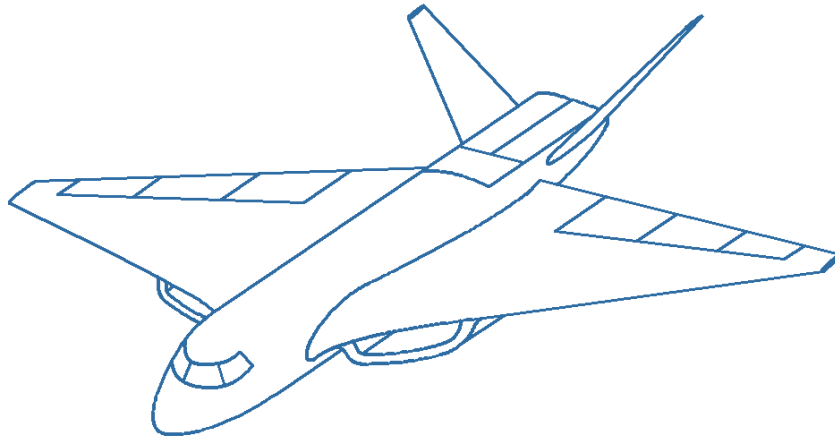


Рис. 47 – Вариант РТС

Они представляют возможность полёта с числом $M=0,8$ вместо $M=0,75$ на крейсерском режиме и числом $M=0,75$ вместо $M=0,5$ у земли. Их компоновка благоприятна для снижения шума на 30 EPN относительно главы 4 ICAO.

В соответствии с методом управления качеством научной концепции выбранный вариант РТС создал основу для организации расчётных и экспериментальных исследований на последующих этапах разработки проекта.

Выводы по главе 4

Рассмотрены три примера задач, решённых с помощью разработанного метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта.

Исходя из постановки задачи в каждом случае были совместно со специалистами по проектированию (специальность 05.07.02) определены значимые для проекта факторы концепции и сформированы проектные признаки. С помощью проведения полнофакторного эксперимента был составлен ряд альтернативных концепций. Расчётные варианты концепции сравнивались с применением мультидисциплинарного исследования. По результатам расчётов были выбраны оптимальные варианты концепций в соответствии с критериями целевой системы.

Применение разработанного метода обеспечило необходимое качество каждой из рассмотренных альтернативных концепций, использующих инновационные технологии, что позволило минимизировать риски выбора неоптимальной концепции и продолжить технические исследования на следующем этапе концептуального проектирования («Синтез систем»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта. Выполнен анализ основных неопределённостей и рисков управления качеством технической концепции на данном этапе. При этом ключевым является риск выбора ошибочной (неоптимальной) концепции будущего изделия авиационной техники. Применение разработанного метода минимизирует этот риск на начальной стадии концептуального проектирования. Это позволяет направить имеющиеся для осуществления проекта ресурсы на разработку оптимальной концепции для гарантированного достижения поставленной цели.

Проанализированы отечественные и зарубежные нормативные документы и практики в области управления качеством на начальных этапах проектирования. Показано, что в настоящее время не существует отечественных стандартов, регламентирующих процесс управления качеством научных проектов. Существующие отдельные специализированные стандарты указывают лишь на необходимость сравнения нескольких проектов изделия на этапе выбора технической концепции, но не формулируют правила формирования и выбора альтернатив.

Рассмотрены различные подходы к организации жизненного цикла проектов на концептуальной стадии, такие как конструкторская разработка, аудит научных проектов, разработка технической концепции.

Проанализированы разработанная NASA методология RIDM и подходы Министерства обороны США в области системного инжиниринга. Выявлены их существенные недостатки, основные из которых – это экспертное формирование перечня альтернативных вариантов и отсутствие правила определения необходимого количества расчётных концепций. Для снижения риска выбора неоптимальной концепции привлекаются дополнительные ресурсы на дублирование исследований. Рассмотрены примеры зарубежных исследований из практики формирования альтернативных концепций, которые также показали отсутствие метода, гарантирующего отыскание оптимального варианта. Отмечено,

что недостатки этих используемых подходов компенсируются затратной организацией исследований за счёт привлечения нескольких фирм-разработчиков и групп независимых экспертов.

Для достижения цели диссертационной работы осуществлена логико-математическая формализация основных понятий методологии концептуального проектирования (концепция, принцип, система), разработанной в ЦАГИ. В этой методологии концепция рассматривается как сочетание принципов действия, устройства и формы, т.е. основных факторов модели разрабатываемого объекта. При этом задача выбора оптимального проекта соответствует алгоритму прямого поиска. Её решением является траектория поиска, ограничивающая выбор концепции. Для построения траектории используются методы факторного анализа и планирования экспериментов в технических исследованиях. Показано, что проведение полнофакторного эксперимента позволяет построить перечень концепций, гарантировано содержащий наилучшее решение. Эксперимент проводится как испытание каждого варианта концепции в системе «затраты – нагрузка – эффект».

Разработанный метод успешно применён на практике для решения ряда задач концептуального проектирования и показал свою эффективность, гарантируя выбор оптимального проекта для дальнейшей разработки с выполнением междисциплинарных расчётных и экспериментальных исследований.

В настоящее время на основе метода управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальных этапах проекта в рамках непрерывного совершенствования нормативной деятельности ЦАГИ осуществляется разработка корпоративного стандарта.

Список литературы

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976.
2. Акимов, В. А. Надёжность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков [и др.] – Москва : Финансовый издательский дом «Деловой экспресс», 2002.
3. Альтшуллер, Генрих. Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач / Г. Альтшуллер. – Петрозаводск : Скандинавия, 2003.
4. Анализ возможных путей развития типоразмерного ряда транспортных самолётов с целью проведения прикладных научных исследований и создания научно-технического задела / И. Е. Ковалёв, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова, А. В. Шустов // Материалы III научно-практической конференции «Проблемы управления научными исследованиями и разработками-2017». – Москва : ИПУ РАН, 2017.
5. Клочков, В. В., Крель, А. В. Анализ эффективности новых принципов управления исследованиями и разработками в авиастроении / В. В. Клочков, А. В. Крель // Экономический анализ: теория и практика. – 2012. – № 19.
6. Анализ технических концепций транспортного самолёта с различными типами и компоновкой силовой установки / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова, Ю. Н. Чернавских [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27, № 4. – С. 30-47.
7. Багриновский, К. А., Бусыгин В. П. Математика плановых решений / К.А. Багриновский, В.П. Бусыгин. – Москва : Наука, Главная редакция физ.мат. литературы, 1980.
8. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский. – Москва : Наука, Главная редакция физ. мат. литературы, 1966.

9. Брайсон, А., Хо, Ю-Ши Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши ; Пер. с англ. – Москва : Мир, 1972. – 544 с.
10. Верификация и валидация как основные процессы контроля качества продукции военного назначения // ФГУП НТЦ Оборонного комплекса «КОМПАС», №1-298/16, 2016.
11. Вождаев, В. В. Лазарев, В. В. Конструктивно-компоновочные способы снижения радиолокационной заметности самолётов / В. В. Вождаев, В. В. Лазарев // Техника воздушного флота. – 2011. – Т. LXXXV, №2(703). – С. 41–50.
12. Гермейер, Ю. Б. Игры с противоположными интересами / Ю. Б. Гермейер. – Москва: Наука, 1976.
13. Исследование операций в гражданской авиации / И. С. Голубев, Р. В. Сакач, Е. Л. Логинов, Е. Г. Пинаев. – Москва : Транспорт, 1980.
14. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения : межгосударственный стандарт : дата введения 1979-01-26.
15. ГОСТ 2.116-84. Карта технического уровня и качества продукции : межгосударственный стандарт : дата введения 1985-07-01.
16. ГОСТ 2.118-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Техническое предложение : межгосударственный стандарт : дата введения 2015-07-01.
17. ГОСТ 2.119-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эскизный проект : межгосударственный стандарт : дата введения 2015-07-01.
18. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения : государственный стандарт Союза ССР : дата введения 1981-01-01.
19. ГОСТ 27.310-95. Надёжность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения : межгосударственный стандарт : дата введения 1997-07-01.

20. ГОСТ Р 51901.3-2007 (МЭК 60300-2:2004). Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надёжности : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2008-09-01.
21. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2017-07-01.
22. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2002-01-01.
23. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем : государственный стандарт Российской Федерации : дата введения 2003-09-01.
24. ГОСТ Р 27.302-2009. Надёжность в технике (ССНТ). Анализ дерева неисправностей : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2010-09-01.
25. ГОСТ Р МЭК 62198-2015. Проектный менеджмент. Руководство по применению менеджмента риска при проектировании : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2016-07-01.
26. ГОСТ Р 52806-2007. Менеджмент рисков проектов. Общие положения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2010-01-01.
27. ГОСТ Р 54124-2010. Безопасность машин и оборудования. Оценка риска : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2012-06-01.
28. ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2017-05-01.
29. ГОСТ Р 58876-2020. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Требования : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2020-09-01.

30. ГОСТ Р ИСО 31000-2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2020-03-01.
31. ГОСТ Р 57193-2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2017-11-01.
32. ГОСТ Р 58045-2017. Авиационная техника. Менеджмент риска при обеспечении качества на стадиях жизненного цикла. Методы оценки и критерии приемлемости риска : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2018-06-01.
33. ГОСТ РВ 15.103-2004. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения аванпроекта и его составных частей. Основные положения : государственный военный стандарт Российской Федерации : дата введения 2006-01-01. Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 37 с.
34. ГОСТ РВ 15.203-2001. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения : государственный военный стандарт Российской Федерации ГОСТ РВ 15.203-2001 : изд. офиц. : взамен ГОСТ В 15.203-79, ГОСТ В 15.204-79 : дата введения 2003-01-01 / Всерос. научно-исследоват. ин-т стандартизации Госстандарта России. – Переизд., окт. 2013 г. с Изм.№1, принятым 14 нояб. 2011 г. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 112 с.
35. Гусев, А. Н. Измерение в психологии. Общий психологический практикум / А. Н. Гусев, Ч. А. Измайлов, М. Б. Михалевская. – Москва : Смысл, 1997.
36. Статистическая оценка характеристик проектируемого самолёта с помощью метода Монте-Карло / В. Е. Денисов, В. К. Исаев, А. М. Рябов, Л. М. Шкадов // Учёные записки ЦАГИ. – 1973. – Т. IV, №2. – С. 14–19.
37. Статистическая оценка характеристик проектируемого самолёта с помощью метода Монте-Карло / В. Е. Денисов, В. К. Исаев, А. М. Рябов, Л. И. Шкадов // Учёные записки ЦАГИ. – 1973. – Т. IV, №2. – С. 14–19.

38. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.- О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка [и др.]; под ред. И. С. Енюкова. – Москва : Финансы и статистика, 1989.
39. Дутов, А. В. Методологические основы управления созданием опережающего научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции / А. В. Дутов // Сборник докладов конференции «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции-2017». – Москва : ИПУ РАН, 2017.
40. Зажигаев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – Москва : Атомиздат, 1978.
41. Ивасенко, А. Г. Инновационный менеджмент : учеб. пособие. – В 2-х ч., ч. 2 / А. Г. Ивасенко, Я. И. Никонова, А. О. Сизова. – Новосибирск: СГГА, 2007.
42. Инновационный менеджмент: Учебник для вузов / Москва : Вита-пресс, 2001.
43. Колосова, О. В. Управление инновационной деятельностью : учебное пособие для вузов по специальности «Управление инновациями» / О. В. Колосова, С. Н. Яшин, Н. А. Мурашова. – Нижний Новгород : НГТУ, 2011. – 566 с. – ISBN 5932728086, 9785932728086.
44. Косяков, А. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Н. Свит, С. Дж. Сеймур, С. М. Бимер. – Москва : ДМК, 2014.
45. Кузьминова, Н. В. Курс лекций по дисциплине «Управление рисками» / Н. В. Кузьминова, Н. В. Моргунова, Н. М. Филимонова. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2007.
46. Макаренков, Н. Л. Инноватика : учебное пособие / Н. Л. Макаренков. – Москва : КомКнига, 2005. – 196 с.
47. Мартынов, А. К., Экспериментальная аэродинамика / А. К. Мартынов. – Государственное издательство оборонной промышленности, 1950.

48. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако и И. Такахара ; Пер. с англ. – Москва : Мир, 1973.
49. Молодший, В. Н. Основы учения о числе в XVIII веке / В. Н. Молодший. – Москва : Учпедгиз, 1953.
50. Наумчук, С. А. Методика оценки и анализа рисков / С. А. Наумчук // Материалы семинара «Управление рисками для руководителей предприятий». – Москва : Академия «ТЮФ Рейнланд», 25.05.2013.
51. Национальные стратегии развития авиационной науки и технологий // Аналитическая записка ФГУП ЦАГИ, 2009.
52. Новиков, Д. А. Управление проектами: организационные механизмы / Д. А. Новиков. – Москва : ПМСОФТ, 2007.
53. Нэреш К., Малхотра. Маркетинговые исследования. Практическое руководство / Нэреш К. Малхотра. – Пер. с англ. – Изд-е 3-е. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003.
54. Шарпак, С. Обзор шестого издания Руководства к Своду знаний по управлению проектами / С. Шарпак // Компания «Проектные сервисы». – URL: <https://www.pmservices.ru/project-management-news/obzor-shestogo-izdaniya-rukovodstva-k-svodu-znaniy-po-upravleniyu-proektami/> (дата обращения: 30.03.2021).
55. Окунь, Я. Факторный анализ / Я. Окунь. – Москва : Статистика, 1974.
56. Оптнер, Л. Стэнфорд. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / Стэнфорд Л. Оптнер. – Пер. на русский язык. – Москва, 1969 // Центр гуманитарных технологий [сайт]. – 2012. – URL: <https://gtmarket.ru/library/basis/5775> (дата обращения: 30.03.2021).
57. Положение о проектной деятельности. Управление научными проектами // Документированная процедура ФГУП ЦАГИ, 2016.
58. Порядок принятия управленческих решений на основе оценки рисков NASA // ФГУП НТЦ Оборонного комплекса «КОМПАС», №1-315/16, 2016.

59. Разработка и анализ концепций самолёта, использующих принципы интеграции / А. Л. Болсуновский, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 4.
60. Инновационный менеджмент: учебно-методическое пособие / М. Санталова, И. Соклакова, В. Сурат, Е. Лебедева. – Москва : Дашков и К, 2021.
61. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / П. И. Седов. – Москва: Наука, 1977.
62. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / П. И. Седов. – Москва: Наука, 1977.
63. Скворцов, Е. Б., Шелехова, А. С. Метод анализа альтернатив в концептуальном проектировании авиационной техники / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Учёные записки ЦАГИ. – 2017. – № 5.
64. Скворцов, Е. Б., Шелехова, А. С. Метод выбора концептуального проекта для технологических исследований в области авиации / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Материалы II научно-практической конференции «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции-2017». – Москва : ИПУ РАН, 2017.
65. Скворцов, Е. Б., Шелехова, А. С. Методология управления рисками научных проектов в зарубежных исследованиях авиационной техники / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Материалы II научно-практической конференции «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции-2017». – Москва : ИПУ РАН, 2017.
66. Скворцов, Е. Б. Шелехова, А. С. Начала теории концептуального проектирования с приложениями в области авиационной науки и технологий / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Управление большими системами. Сборник трудов. – Москва : ИПУ РАН, 2018. – №75.
67. Скворцов, Е. Б., Шелехова, А. С. Верификация и валидация технологий в концептуальном проектировании авиационной техники / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Материалы XII Международной научно-практической

- конференции «Перспективы развития науки и образования». – Москва, 2016. – С. 143-149.
68. Скворцов, Е. Б., Шелехова, А. С. Концептуальное проектирование и системная интеграция технологий / Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». – Москва, 2016. – С. 150-158.
69. Спецтема / А. В. Бондарев, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Аэрокосмическая техника и технология. – 2020. – № 1.
70. Стандарт ОАО «ОАК» Порядок управления авиационными программами ОАО «ОАК». Общие принципы. – Москва : ОАК, 2008.
71. Стелл, Р. Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории / Р. Р. Стелл. – Москва : Просвещение, 1968.
72. Технология самолётостроения / под ред. А. Л. Абибова. – Москва : Машиностроение, 1970.
73. Том, Де Марко, Тимоти, Листер. Вальсируя с Медведями: управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Том Де Марко, Тимоти Листер. – Москва : Компания p.m.Office, 2005. – ISBN 5-902681-03-0, 0-932633-60-9.
74. Управление качеством технической концепции перспективного транспортного самолёта на начальной стадии проектирования / И. Е. Ковалев, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Материалы IV научно-практической конференция «Управление научными исследованиями и разработками. Государство и наука: новые модели управления». – Москва, 2018.
75. Шафрай, Ф. А. Риски модернизации в России // Сайт о нанотехнологиях #1 в России [сайт]. – 2010. – URL: <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/riski-modernizatsii-v-rossii> (дата обращения: 30.03.2021).
76. Фокичева, Е. А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований: учебное пособие / Е. А. Фокичева, М. И. Алексеев. – Вологда : Изд-во ВоГУ, 2014.

77. Фролов, И. Ф. Определение параметров самолёта и двигателя, обеспечивающих максимальную теоретическую дальность при заданной скорости полёта / И. Ф. Фролов, О. К. Югов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1968. – № 3.
78. Хиллсон, Д. Управление рисками, пирамида Маслоу и меметика / Д. Хиллсон // Управление проектами. – 2017, – № 1 (40).
79. Хиллсон, Д. Управление рисками, пирамида Маслоу и меметика / Д. Хиллсон // Управление проектами. – 2017, – № 1 (40). – С. 5–19.
80. Ценообразование в NASA. Расчет стоимости рисков // ФГУП НТЦ Оборонного комплекса «КОМПАС», №1-36/16 от 2016.
81. Чуев, Ю. В. Исследование операций в военном деле / Ю. В. Чуев. – Москва : Воениздат, 1970.
82. Шелехова, А. С. Управление качеством проектирования авиационной техники на этапе выбора концепции / А. С. Шелехова // Тезисы XVII Международной конференции «Авиация и космонавтика-2018». – Москва : МАИ, 2018.
83. Шкадов, Л. М. Лекции по оптимизации режимов полёта и параметров самолётов / Л. М. Шкадов. – Москва : МФТИ, 1970.
84. Шкадов, Л. М. Показатель относительного уровня технического совершенства воздушно-реактивного двигателя для дальних самолётов / Л. М. Шкадов // Учёные записки ЦАГИ. – 1972. – № 5.
85. Шкадов, Л. М. Показатель относительного уровня технического совершенства планера самолёта / Л. М. Шкадов // Учёные записки ЦАГИ. – 1972. – № 6.
86. Шкурко, В. Е. Управление рисками проектов: учеб. пособие / В. Е. Шкурко. – Министерство образования и науки РФ ; Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014.
87. Югов, О. К., Селиванов О. Д. Согласование характеристик самолёта и двигателя / О. К. Югов, О. Д. Селиванов. – Москва : Машиностроение, 1975.
88. Best Practices. How to Avoid Surprises in the World's Most Complicated Technical Process // Department of the NAVY, NAVSO P-6071, 1986.

89. Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, Taxonomy-Based Risk Identification, 1993.
90. Department of Defense Risk Management Guide for Defense Acquisition Programs, 7ed., 2014.
91. Department of Defense Risk, Issue, and Opportunity Management Guide for Defense Acquisition Programs, 2017.
92. Disslkoen, A. VSTOL concepts for special operations / A. Disslkoen // The 46th Annual of the American Helicopter Society Forum Proceedings. – May 1999. – P. 183–192.
93. Dod 4245.7M, Transition from Development to Production, 1985.
94. Dod Directive 5000.1. The Defense Acquisition System, 2003.
95. Dod Instruction 5000.02. Operation of the Defense Acquisition System, 2015 (Incorporating Changes 2017).
96. ISO 21500:2012. ГОСТ Р ИСО 21500-2014 Руководство по проектному менеджменту : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2015-03-01.
97. ISO 31000. ГОСТ Р 51901.7-2017/ISO/TR 31004:2013 Менеджмент риска. Руководство по внедрению ИСО 31000 : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2018-12-01 .
98. Jane's Defense Weekly, 17/III. – 1999. – № 11, V.31. – P. 29.
99. John, P. Kindinger. Risk Factor Analysis A New Qualitative Risk Management Tool / John P. Kindinger // PMI Connections 2000, Project Management Institute Seminar & Symposium. – September 12, 2000. – Houston, TX.
100. Meese, J.R. The 21 sty Century Tactical Airlifter / J.R. Meese, M.L. Millett // SAE Paper 872 339.
101. NASA Risk Management Handbook. NASA/SP-2011-3422 Version 1.0, 2011.
102. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). – Sixth Edition. – 2017.
103. Ruscello, A. Conceptual Design and Analysis of a Special Operations Transport / A. Ruscello // AIAA Paper. – 1992. – № 1066. – P. 1–9.

104. Sauser, B., et al., From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels / B. Sauser, et al. // Conference on Systems Engineering Research. – Los Angeles, CA. – April 7th – 8th 2006.
105. Skvortsov, E. B. Direct Search in Conceptual Design / E. B. Skvortsov // Acta Politechnica Journal of Advanced Engineering. – Prague: Czech Technical University (CTU). – 2000. – Vol. 40, 1. – P. 24–29.
106. Technical Risk Assessment Methodology // AMSAA, TARDES. – Sept.2011.
107. Top Ten Ways to Manage Technical Risk // NAVSO P-3686. – 1998.
108. Wiler, C. D. Manned Strategic Systems Concepts / C. D. Wiler, D. P. Raymer // 1990-2000. AIAA Paper, 79–1793.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Уровни готовности технологий

Таблица А.1 – Уровни готовности технологий

Шкала уровней готовности технологий (УГТ)	Система показателей, определяющих уровни готовности технологий на различных этапах их разработки
УГТ1	Выявлены и опубликованы фундаментальные принципы. Сформулирована идея решения той или иной физической или технической проблемы, произведено её теоретическое и/или экспериментальное обоснование
УГТ2	Сформулированы технологическая концепция и/или возможные применения возможных концепций для перспективных объектов. Обоснованы необходимость и возможность создания новой технологии или технического решения, в которых используются физические эффекты и явления, подтвердившие уровень УГТ1. Подтверждена обоснованность концепции, технического решения, доказана эффективность использования идеи (технологии) в решении прикладных задач на базе предварительной проработки на уровне расчётных исследований и моделирования
УГТ3	<p>Даны аналитические и экспериментальные подтверждения по важнейшим функциональным возможностям и/или характеристикам выбранной концепции. Проведено расчётное и/или экспериментальное (лабораторное) обоснование эффективности технологий, продемонстрирована работоспособность концепции новой технологии в экспериментальной работе на мелкомасштабных моделях устройств. На этом этапе в проектах также предусматривается отбор работ для дальнейшей разработки технологий.</p> <p>Критерием отбора выступает демонстрация работы технологии на мелкомасштабных моделях или с применением расчётных моделей, учитывающих ключевые особенности разрабатываемой технологии, или эффективность использования интегрированного комплекса новых технологий в решении прикладных задач на базе более детальной проработки концепции на уровне экспериментальных разработок по ключевым направлениям, детальных комплексных расчётных исследований и моделирования</p>
УГТ4	Компоненты и/или макеты проверены в лабораторных условиях. Продемонстрированы работоспособность и

	совместимость технологий на достаточно подробных макетах разрабатываемых устройств (объектов) в лабораторных условиях
УГТ5	Компоненты и/или макеты подсистем верифицированы в условиях, близких к реальным. Основные технологические компоненты интегрированы с подходящими другими («поддерживающими») элементами, и технология испытана в моделируемых условиях. Достигнут уровень промежуточных/полных масштабов разрабатываемых систем, которые могут быть исследованы на стендовом оборудовании и в условиях, приближенных к натурным условиям. Испытывают не прототипы, а только детализированные макеты разрабатываемых устройств
УГТ6	Модель или прототип системы/подсистемы продемонстрированы в условиях, близких к реальным. Прототип системы/подсистемы содержит все детали разрабатываемых устройств. Доказаны реализуемость и эффективность технологий в натуральных или близких к натурным условиям и возможность интеграции технологии в компоновку разрабатываемой конструкции, для которой данная технология должна продемонстрировать работоспособность. Возможна полномасштабная разработка системы с реализацией требуемых свойств и уровня характеристик
УГТ7	Прототип системы прошёл демонстрацию в эксплуатационных условиях. Прототип отражает планируемую штатную систему или близок к ней. На этой стадии решают вопрос о возможности применения целостной технологии на объекте и целесообразности запуска объекта в серийное производство
УГТ8	Создана штатная система и освидетельствована (квалифицирована) посредством испытаний и демонстраций. Технология проверена на работоспособность в своей конечной форме и в ожидаемых условиях эксплуатации в составе технической системы (комплекса). В большинстве случаев данный УГТ соответствует окончанию разработки подлинной системы
УГТ9	Продемонстрирована работа реальной системы в условиях реальной эксплуатации. Технология подготовлена к серийному производству

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы в МАИ



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Козорез Д. А.

2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шелеховой Анны Сергеевны в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Настоящим актом подтверждается использование результатов, полученных в диссертационной работе Шелеховой Анны Сергеевны «Управление качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта», при реализации основных образовательных программ высшего образования:

– магистратуры по направлению подготовки 24.04.04 – Авиастроение. Образовательная программа – Управление качеством в авиастроении, 27.04.02 – Управление качеством. Образовательная программа – Управление качеством наукоёмких производств;

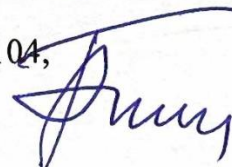
– бакалавриата по направлению подготовки 27.03.02 – Управление качеством. Образовательная программа – Управление качеством в авиастроении.

Результаты диссертационного исследования имеют научное и практическое значение и применяются при реализации учебных программ дисциплин: «Менеджмент проектов», «Управление процессами», «Управление качеством в промышленности», «Информационные технологии в управлении качеством и защита информации». Результаты диссертации были обсуждены на заседании кафедры № 104 «Технологическое проектирование и управление качеством» 31.08.2020 г., протокол № 1.


Директор дирекции Института № 1
«Авиационная техника»,
д.т.н., доцент

 О. С. Долгов

Научный руководитель кафедры № 104,
д.т.н., профессор

 Б. В. Бойцов

Доцент кафедры № 104,
к.т.н., доцент

 А. Р. Денискина

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения результатов диссертационной работы в ЦАГИ

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального
директора ФГУП «ЦАГИ»,
д-р физ.-мат. наук, проф.

А.Л. Медведский

« 02 » 09 2021 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Шелеховой Анны Сергеевны на тему «Управление качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта» в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Настоящим актом подтверждается использование результатов, полученных в диссертационной работе Шелеховой Анны Сергеевны «Управление качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта», в деятельности ФГУП «ЦАГИ». Разработанный Шелеховой А.С. метод управления качеством научной концепции применён для решения ряда задач концептуального проектирования перспективных летательных аппаратов по контрактам ФГУП «ЦАГИ» с Минпромторгом России.

Начальник научно-исследовательского
комплекса управления научными
проектами, д.т.н., профессор

И.Е. Ковалев

Начальник научно-исследовательского
отдела, к.т.н

Е.Б. Скворцов