

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель            д.т.н., профессор  
Денискин Юрий Иванович

Официальные оппоненты:    Мартынов Виталий Владимирович,  
д.т.н., профессор,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
заведующий кафедрой экономической  
информатики

Новиков Валерий Александрович,  
к.т.н., доцент,  
федеральное государственное автономное  
учреждение дополнительного профессионального  
образования «Академия стандартизации,  
метрологии и сертификации»,  
проректор по учебно-методической работе

Ведущая организация            Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тульский государственный  
университет», г. Тула

Защита диссертации состоится 10 июня 2021 года в 12.00 на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Система менеджмента качества продукции предусматривает сквозное интегрированное управление качеством на всех стадиях жизненного цикла изделий, в том числе авиастроения. Особый интерес представляет начальная концептуальная стадия жизненного цикла, когда принимаются наиболее общие, принципиальные решения, определяющие дальнейшую судьбу продолжительного проекта и эффективность будущего изделия. Сложный процесс концептуального проектирования авиационной техники включает несколько этапов с различным содержанием деятельности проектной команды. Один из начальных этапов – «Анализ концепции» – полностью определяет идейное содержание информации о путях достижения цели проекта. Задачей этого этапа является формирование ряда возможных вариантов проектируемого объекта и выбор оптимальной концепции. Дальнейшие этапы раскрывают и уточняют эту информацию, и после экспериментального подтверждения она используется на следующей, демонстрационной стадии жизненного цикла изделия.

Исследование, выполненное в данной работе, посвящено проблеме управления качеством концепции авиационного изделия на этапе «Анализ концепции». 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. Лапидус 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.

### **Цели 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 решены следующие **задачи**:

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 проектными решениями 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» и ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского» для решения ряда задач концептуального проектирования перспективных летательных аппаратов.

#### **Методология и методы исследования.**

Метод управления качеством научной концепции в диссертации разработан 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.).

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация объемом 125 страниц включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы из 108 наименований, 3 приложения. В работе содержится 47 рисунков и 17 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обозначена существующая проблема управления качеством концепции, показана стадия жизненного цикла изделия, на котором она возникает, аргументирована важность ее решения. Обоснована актуальность диссертационной работы, описаны цели и задачи, показана научная новизна исследования, сформулированы выносимые на защиту положения, аргументирована теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** диссертации показан жизненный цикл создания нового объекта, на всем протяжении которого в соответствии с системой менеджмента качества продукции необходимо сквозное интегрированное управление качеством. Обосновано, что 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.

Проанализированы отечественные нормативные документы в области управления качеством проектов авиационной техники. Анализ показал, что в настоящее время в России не существует нормативных документов, регламентирующих управление *научными* проектами, поэтому были рассмотрены два блока документов, применение которых возможно для управления качеством при проектировании изделий авиационной техники: нормативные документы в области управления проектами и документы в области управления качеством. Показано, что в них не содержится никаких требований к этапу анализа альтернатив. Рассмотрены также 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.

Рассмотрены зарубежные нормативные документы по анализу альтернатив на начальных этапах проектирования: система принятия решений Risk-Informed Decision Making, являющаяся частью методологии проектного управления NASA, и подходы к формированию альтернативных решений в рамках методологии системного инжиниринга Министерства обороны США. Показаны недостатки этих



подходов, основными из которых являются 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).

Проанализирован зарубежный опыт выбора перспективных технологий для концептуальных проектов, который показал разные подходы разработчиков к формированию альтернативных научных концепций. Выделены 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.

Сделан вывод, 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.

В **главе 2** представлены основные элементы методологии концептуального проектирования ЦАГИ, в рамках которой разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив.

Показан подход к целеполаганию при проектировании нового объекта, к котором проектное задание включает требования к объекту в виде связей и ограничений, наложенных на целевые индикаторы, а сама цель интерпретируется как потребная (планируемая) система нормированных показателей объекта. Проектируемый объект представлен как система, состоящая из двух частей, отражающих внутренние связи объекта и связь объекта с внешней средой.

Продемонстрировано отличие задачи проектирования объекта, в том числе концептуального, от задачи управления объектом: для неё характерны тройственные отношения (степень сложности  $n = 3$ ) вместо бинарных (степень сложности  $n = 2$ ). Схема системы проектирования представлена в виде логической модели (рис. 1).

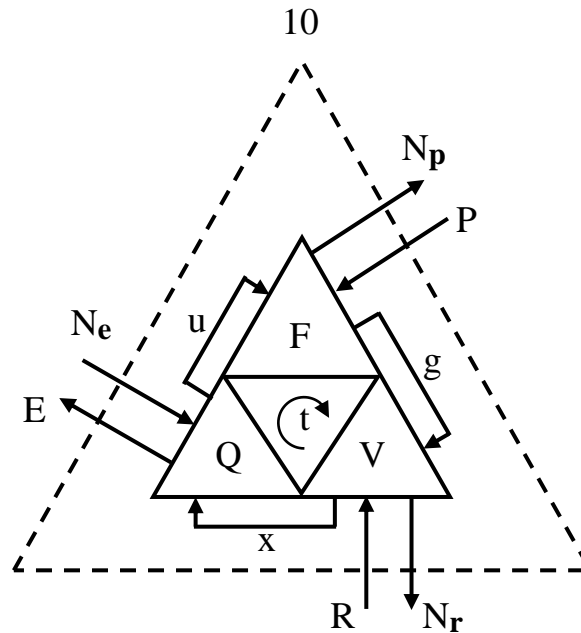


Рис. 1 – Система «нагрузка-затраты-эффект»

В общем понятии системы выделено два частных: объектовая система и целевая система.

*Целевая система*  $S_z$  – модель формализованных связей объекта со средой обитания, объединённых целью проекта.

$$S_z \subset R \times P \times E,$$

где  $R$  – ресурсы среды,  $P$  – внешние нагрузки,  $E$  – полезные эффекты.

*Объектовая система*  $S_o$  – модель обособленного от среды обитания объекта, состоящего из взаимосвязанных компонентов, интегрированных в одно целое для достижения цели проекта.

$$S_o \subset V \times F \times Q,$$

где  $V$  – устройство,  $F$  – форма,  $Q$  – действие.

Соответствующее понятие целевой системы расширено включением фактора «нагрузка» от внешней среды, который дополняет известные факторы «эффект-затраты».

Осуществлена логико-математическая формализация основных понятий концептуального проектирования таких, как концепция, принцип, технология.

Сформулировано понятие концепции в терминах теории множеств, теории поля и общей теории систем. *Концепция*  $\vec{K}$  определена как сочетание принципов действия, устройства и формы, образующих информационно-логическую модель объекта:  $\vec{K} \subset \vec{V} \times \vec{F} \times \vec{Q}$ .

*Принципы* представлены как направленные свертки логически связанной информации, в составе концепции являющиеся векторами, величина каждого из которых определяется соответствующим компонентом объектовой системы, а направление к цели задано ортом-идеей  $\vec{\lambda}$ , в котором заключена объединяющая логика принципа.

Выделена триада принципов:

- *принцип формы*  $\vec{F}$  - содержит информацию о границах объекта и его элементов.
- *принцип устройства*  $\vec{V}$  - содержит информацию о внутренней структуре объекта.
- *принцип действия*  $\vec{Q}$  - содержит информацию об организации объекта.

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

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. Показано, что ключевым риском анализа альтернатив является риск выбора неоптимальной научной концепции. Ключевой причиной данного риска является построение недостаточного числа вариантов изделия и неправильный метод их формирования.

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.

В **главе 3** метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта разработан в рамках описанной в разделе 2 методологии концептуального проектирования. Он сформирован с применением методов факторного анализа и полнофакторного эксперимента.

Рассмотрен метод факторного анализа и особенности его применения факторного анализа на этапе выбора оптимальной концепции, а именно:

- 1) в проектном исследовании в качестве факторов рассматриваются принципы, производящие концепцию;
- 2) теория планирования экспериментов оперирует независимыми факторами, значения которых при описании объектовой системы задаются параметрически для сравнительной оценки соответствующих критериев целевой системы;
- 3) независимость испытываемых 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.

Сделано заключение, что выбор факторов на этапе анализа концепции необходимо осуществлять на оценке чувствительности критериев целевой системы к изменениям параметров объектовой системы, чтобы включить в план экспериментов ограниченное число наиболее значимых факторов (задача факторного анализа).

Рассмотрен метод планирования экспериментов. Показано, что указанные в главе 2 принципы в терминах планирования эксперимента являются основными факторами и носят дискретный характер, а эксперимент проводится на мысленных моделях, где опытом является каждый вариант концепции.

Для 3-х принципов построение 8-ми вариантов концепций методом полнофакторного эксперимента наглядно можно представить в виде таблицы 1.

Таблица 1 – 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 – отсутствие принципиальной новизны;

1 – наличие принципиальной новизны, обязательной для уникального продукта.

В терминах концептуального проектирования задача поиска оптимальной концепции описана следующим образом:

Цель проекта формирует целевую систему объекта  $S_z$ . Существующий технологический базис, а также гипотезы формируют объектовую систему объекта  $S_o$ .

Целевая и объектовая системы формируют элементы замысла  $D$ , которые образуют функциональную систему, в которой показатели объектовой системы стремятся к показателям целевой системы.

Элементы замысла из множества  $D(\tau)$  составляют информационную модель объекта как функцию, определённую на множестве  $S_o$  со значениями на множестве

$S_z$ . В документальном виде такие функциональные системы образуют собственно «проекты».

На основании данных систем проектант генерирует идеи  $\vec{\lambda}_i$ , базируясь на которых формирует принципы, направленные на достижение поставленной цели. На основе принципов выбираются проектные (системные) признаки, которые формируют систему объекта.

На каждом шаге поиска  $j = 0, 1, 2, \dots, (c - 1)$  создаются концепции как сочетания принципов.

Ряд концепций образуют программу поиска решения  $\vec{K}(0), \vec{K}(1) \dots \vec{K}(c - 1)$ . По каждому варианту рассчитываются значения на поле целевых показателей  $S_z(0), S_z(1) \dots S_z(c - 1)$ .

Тогда решением задачи является концепция, производящая показатели качества такие, что максимизируется соотношение эффекта к затратам при заданных внешних нагрузках

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

Таким образом, на основе рассмотренных методов факторного анализа и полнофакторного эксперимента разработан метод управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив на начальном этапе проекта. Основными шагами метода являются:

- 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.

Показано, что разработанный метод обеспечивает качество по двум аспектам:

- качество продукта, обеспечивая выбор оптимальной концепции,
- качество управления проектом, осуществляя полное представление возможных альтернативных концепций.

Эффект метода продемонстрирован на рис.2, на котором приведена функция вероятности успеха при выборе рациональной концепции от числа анализируемых вариантов концепции при  $n=3$ .

Таким образом, разработанный метод позволяет минимизировать риски неправильного выбора технической концепции.

В главе 4 приведены примеры практических задач концептуального проектирования, при решении которых был применен разработанный метод

управления качеством научной концепции при формировании и анализе альтернатив.

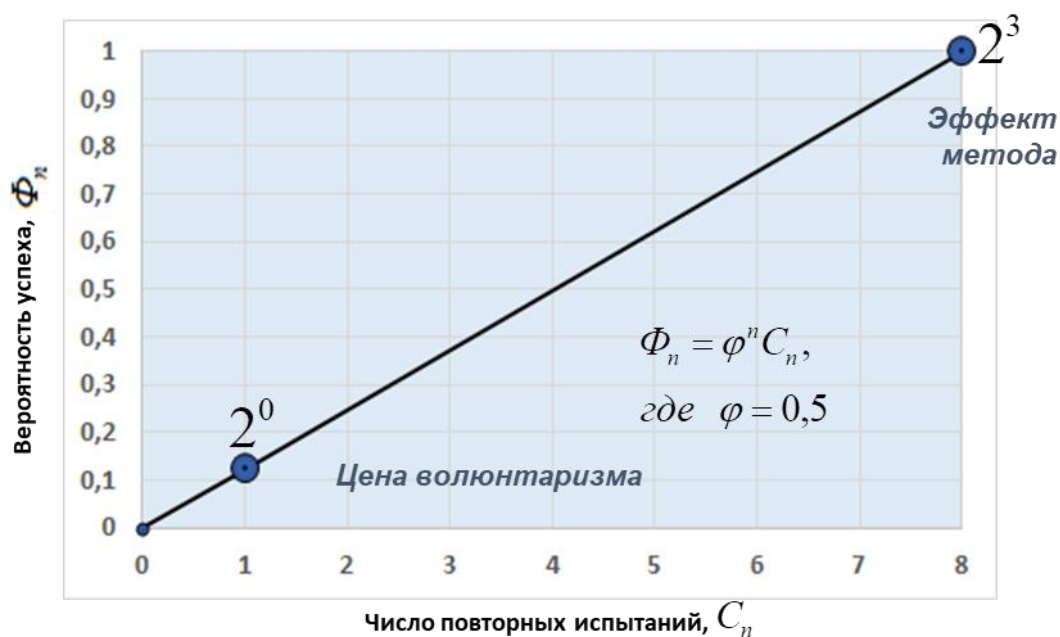


Рис. 2 – Вероятность успеха поиска оптимальной концепции

В качестве первого примера апробации метода приведен проект пассажирского «летающего крыла» (ЛК), цель которого состояла в поиске наилучшей концепции самолета типа ЛК, обладающего большей эффективностью, чем самолет традиционной компоновки.

В соответствии с разработанным методом управления качеством научной концепции на начальном этапе проекта были выявлены основные принципы и на их основе сформированы 4 альтернативные концепции «летающего крыла», а также общий прототип ЛК-0 традиционной схемы для оценки целесообразности применения самолётов типа ЛК для пассажирской авиации (рис. 3).

Осуществлена визуализация каждой концепции в виде модели самолета с приложением выбранных проектных признаков (рис. 4).

Методами междисциплинарного исследования выполнен анализ разработанных альтернатив. При заданных требованиях к транспортной задаче определена система показателей, характеризующих потребные для этого ресурсы.

В результате было получено, что наибольшую эффективность может обеспечить концепция ЛК-2. Теоретические, а затем 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.

Другим примером применения разработанного метода послужила задача обоснования эффективных принципов для концепции 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.

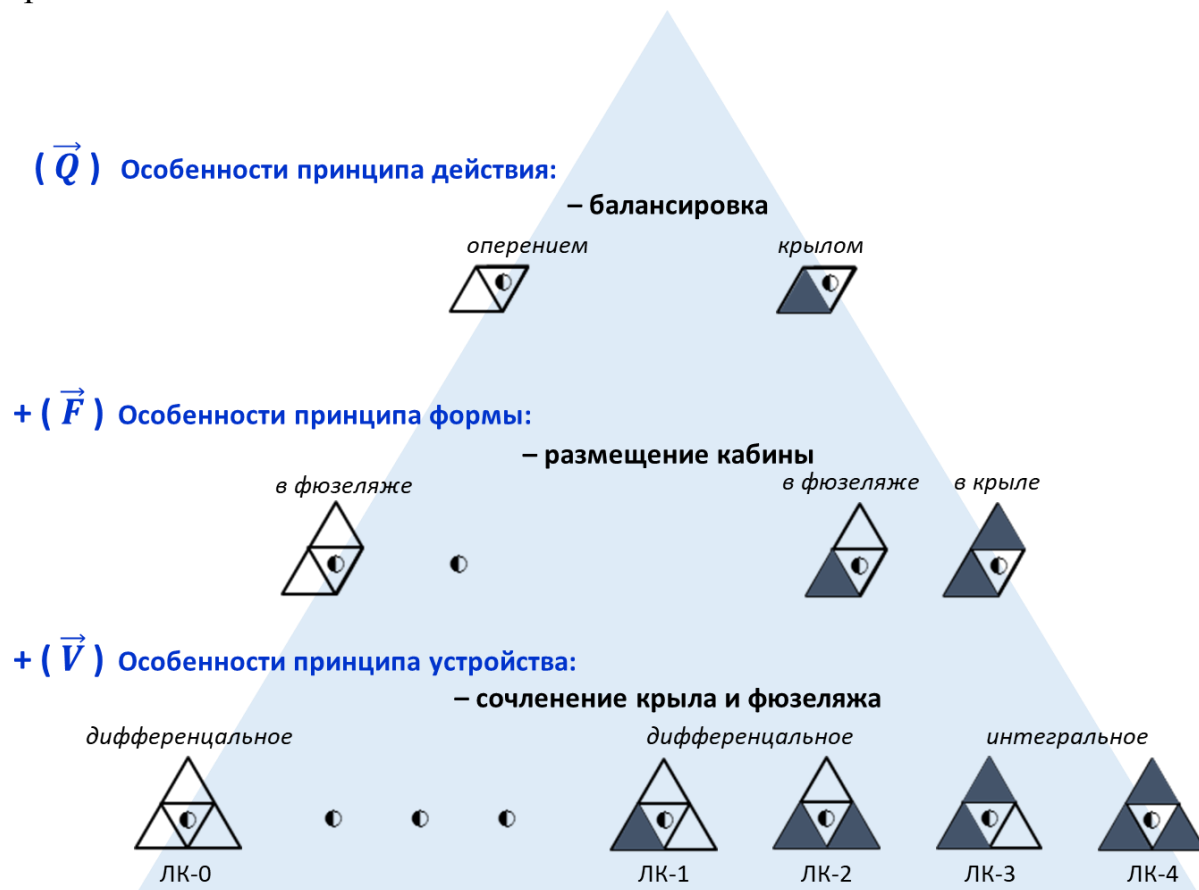


Рис. 3 – Модель концептуального проектирования «летающего крыла»

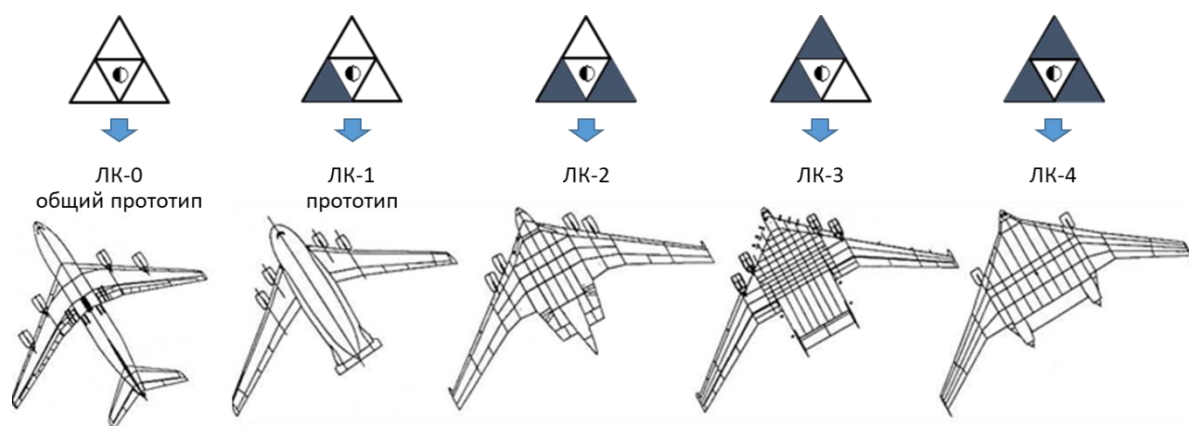


Рис. 4 – Альтернативные концепции пассажирского «летающего крыла»

В соответствии с разработанным методом управления качества научной концепции на начальном этапе проекта были выявлены основные принципы и на их основе были сформированы 8 альтернативных вариантов концепции (рис. 5).

Логические модели были преобразованы в проектные (рис. 6).

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

– степень двухконтурности ТРДД

$m_0 = 4...6$



$m_0 = 14...18$



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

– степень интеграции элементов ТРДД

$\Delta$  - обычный ТРДД     $\blacktriangle$  - нетрадиционная РСУ



+  $(\vec{V}_3)$  Особенности принципа устройства:

– степень интеграции планера и силовой установки

$\Delta$  - обычная компоновка     $\blacktriangle$  - нетрадиционная компоновка



Рис. 5 – Модель концептуального проектирования дальнего магистрального самолёта гражданской авиации

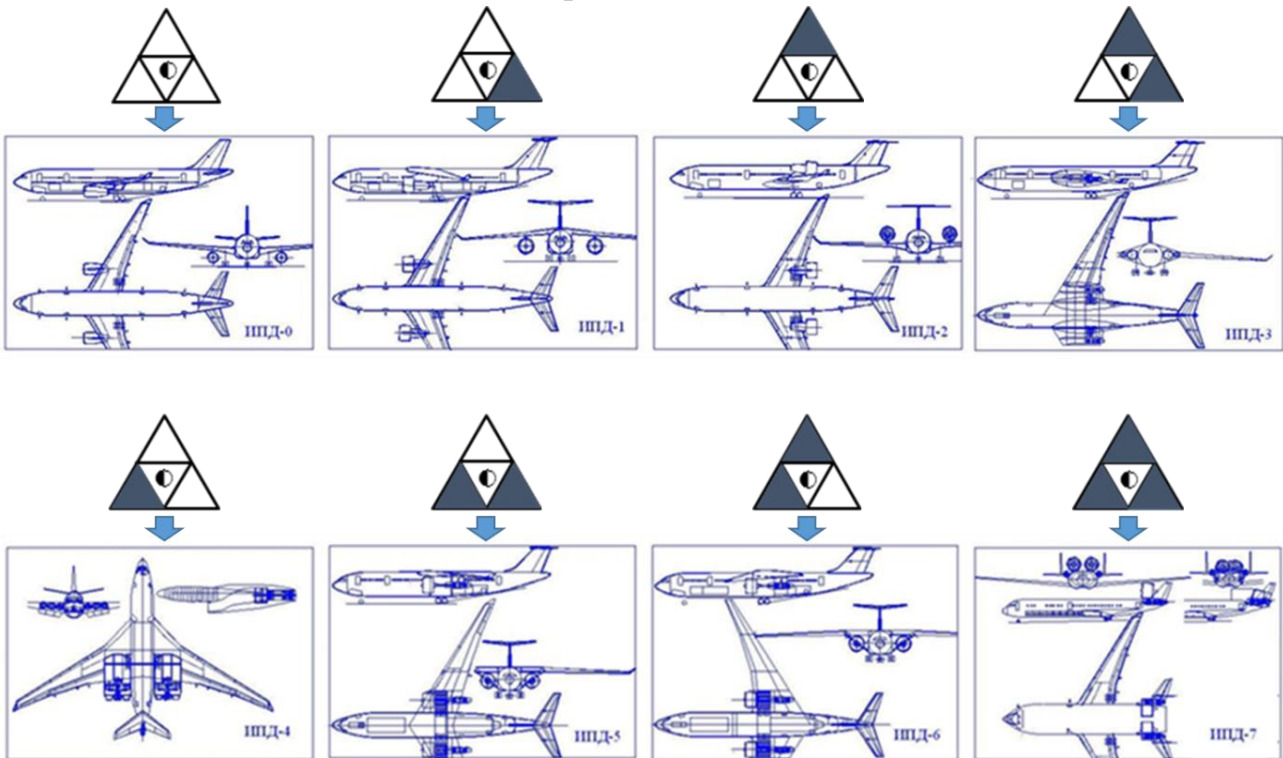


Рис. 6 – Разработанные варианты концепции ИПД



В результате проведённого мультидисциплинарного исследования оптимальным вариантом был выбран ИПД-3. В настоящее время ведется экспериментальное исследование рекомендованной конфигурации для доказательства технической осуществимости.

В качестве заключительного примера апробации метода показано решение задачи анализа возможной концепции регионального транспортного самолета. Целью данной работы являлся научно обоснованный выбор технической концепции многофункционального регионального самолёта транспортной категории (РТС), создание которого возможно к 2035 г.

Исходя из постановки задачи и эксплуатационных требований к РТС были выбраны основные факторы (принципы) и на их основе сформированы 8 альтернативных концепций (рис. 7).

В соответствии с методом был осуществлен переход от полученных логических моделей к проектам регионального транспортного самолёта (рис. 8).



Рис. 7 – Модель концептуального проектирования РТС

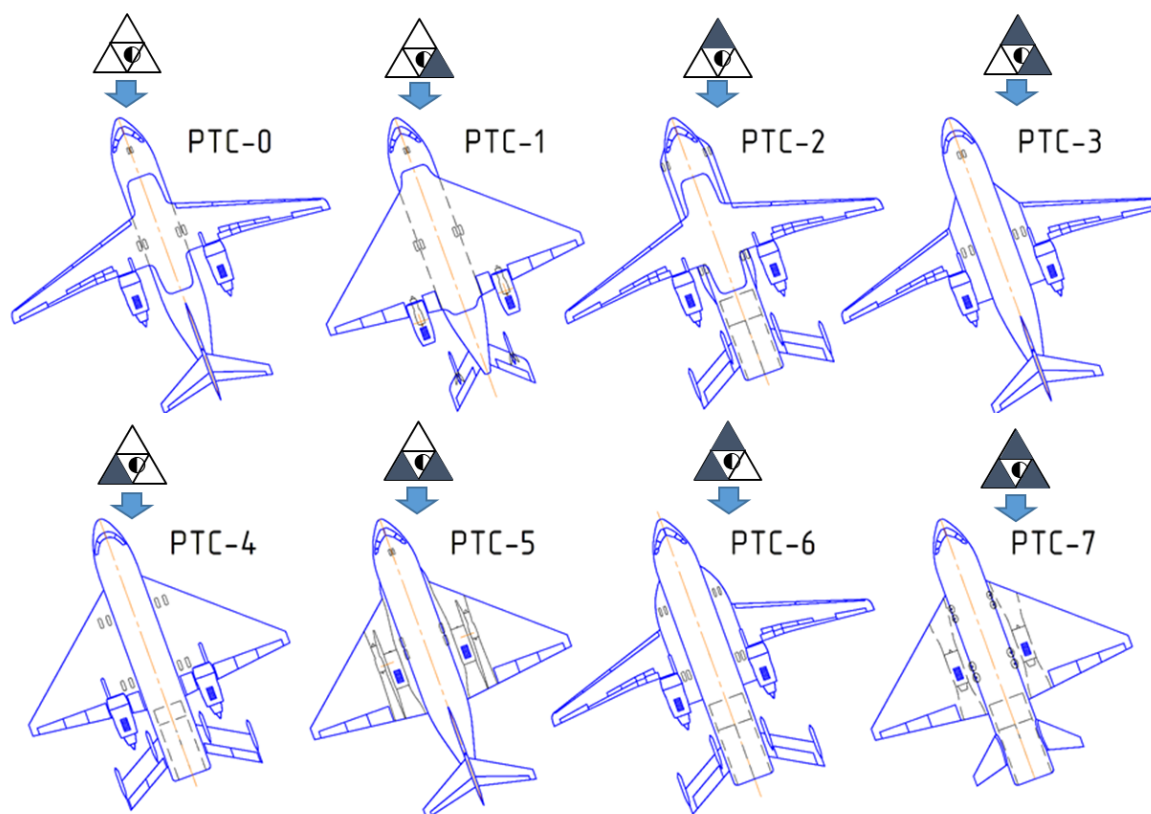


Рис. 8 – Разработанные варианты концепции РТС

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

\*\*\*

Применение разработанного метода в рассмотренных задачах 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.

Практика показала, что разработанный метод лишен недостатков других подходов к формированию и анализу альтернативных вариантов научных концепций и гарантирует выбор оптимальной концепции (таблица 2).

Таблица 2 – Преимущества метода управления качеством научной концепции (МЕТОД)

Практики выбора технических решений	Система принятия решений RIDM (NASA)	Системный инжиниринг (MO CША)	Порядок управления авиационными программами ОАК	Система конструкторской документации (ГОСТы РФ)	Система УГТ	МЕТОД
Техническое задание	+	+	+	+	-	+
Логико-математическая формализация объекта управления	-	-	-	-	-	+
Факторный анализ продуктивных идей	-	-	-	-	-	+
Построение системы признаков идей (правил проектирования)	-	-	-	-	-	+
Планирование эксперимента с концепциями	Число известно нестрого, нет управления содержанием	Число известно нестрого, нет управления содержанием	Включает техническое предложение	В техпредложении число вариантов не определено	-	+
Формирование вариантов технического облика	+	+	-	+	-	+
Сравнение эффективности вариантов и выбор оптимального	+	Необходима группа экспертов	+	Выбор варианта необходим	Нужен выбор идеи для аудита	+
Численный контроль рисков ошибки	+	-	Описание рисков	-	-	+

## 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 научной концепции на данном этапе. При этом ключевым среди них является риск выбора ошибочной концепции будущего изделия авиационной техники. Применение разработанного метода минимизирует этот риск на начальной стадии концептуального проектирования. Это позволяет направить имеющиеся ресурсы на дальнейшую разработку проекта 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 стандарты в системе конструкторской документации указывают лишь на необходимость сравнения нескольких вариантов изделия на этапе выбора проектного решения, но не устанавливают правил формирования и выбора альтернатив.

В разработанной NASA методологии RIDM и подходах 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. В этих условиях для снижения риска выбора неоптимальной концепции привлекаются дополнительные ресурсы на дублирование исследований. Отмечено, что недостатки этих подходов компенсируются затратной организацией исследований за счёт привлечения нескольких фирм-разработчиков и групп независимых экспертов.

Для исключения указанных недостатков и 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 логической 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. 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.
2. 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.
3. Разработка и анализ концепций самолета, использующих принципы интеграции / А. Л. Болсуновский, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25. № 4.
4. 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.

### Другие публикации

1. 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.
2. 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.
  3. 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.
  4. 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.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Управление качеством технической концепции перспективного транспортного самолёта на начальной стадии проектирования / И. Е. Ковалёв, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Материалы IV научно-практической конференции «Управление научными исследованиями и разработками. Государство и наука: новые модели управления». – Москва, 2018.
  8. Спецтема / А. В. Бондарев, Е. Б. Скворцов, А. С. Шелехова [и др.] // Аэрокосмическая техника и технология. – 2020. – № 1.