

На правах рукописи



**Арутюнов Артем Георгиевич**

**«МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ОБЛИКА  
КОММЕРЧЕСКОГО ТЯЖЕЛОГО РАМПОВОГО ГРУЗОВОГО САМОЛЕТА  
НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗ УСЛОВИЯ ЕГО  
ПРИБЫЛЬНОСТИ»**

**Специальность 05.07.02**

**«Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»**

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Москва 2017**

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

Научный руководитель: **Ендогур Аскольд Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры №101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Комаров Валерий Андреевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

**Скворцов Евгений Борисович** – кандидат технических наук, заместитель начальника НИО-10, НИК-УНП, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»

Ведущее предприятие: **Акционерное общество «Гражданские самолёты Сухого»**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, главный административный корпус, зал заседаний ученого совета.

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

Автореферат разослан  
Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д212.125.10  
кандидат технических наук, доцент

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Денискина А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

На рынке авиационных грузовых перевозок сформировались три обширные сферы применения транспортных самолетов (ТС):

- перевозки генеральных грузов с использованием унифицированных контейнеров и поддонов;
- перевозки нестандартных грузов, таких как колесная и гусеничная техника, промышленное оборудование, воздушный и водный транспорт и т.п.;
- перевозки уникальных негабаритных грузов, таких как агрегаты воздушных судов, аэрокосмические грузы, крупногабаритные строительные конструкции и т.п.

Объектом исследования настоящей диссертационной работы является коммерческий тяжелый рамповый грузовой самолет (КТРГС), предназначенный для перевозок грузов различного типа, размеров и назначения. Такие самолеты могут применяться во всех трех сферах грузоперевозок (рисунок 1), от транспортировки стандартных поддонов до фюзеляжей среднемагистральных самолетов, обеспечивать доставку грузов на аэродромы, необорудованные специальным погрузочно-разгрузочным оборудованием (ПРО). К рамповым грузовым самолетам (РГС) относятся такие воздушные суда (ВС), как Ан-124-100, Ил-76ТД, MD-17 (С-17), L-100 (С-130), L-500 (С-5) и другие.



Рисунок 1 - Сферы применения транспортных самолетов

Современные РГС, эксплуатируемые на рынке перевозок нестандартных авиационных грузов, выработали значительную часть своего ресурса. По различным оценкам ресурс сверхтяжелых транспортных самолетов типа Ан-124-100 хватит в

среднем примерно на 15-20 лет. Создание нового КТРГС является сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом. К тому же рынок сбыта для такого самолета ограничен.

Успешная реализация нового проекта КТРГС зависит от решений, принятых на этапе концептуального проектирования (рисунок 2), когда разрабатывается техническое предложение о создании нового самолета и необходимо рассмотреть несколько вариантов концептуального облика самолета, выполнить их параметрические и оптимизационные исследования.

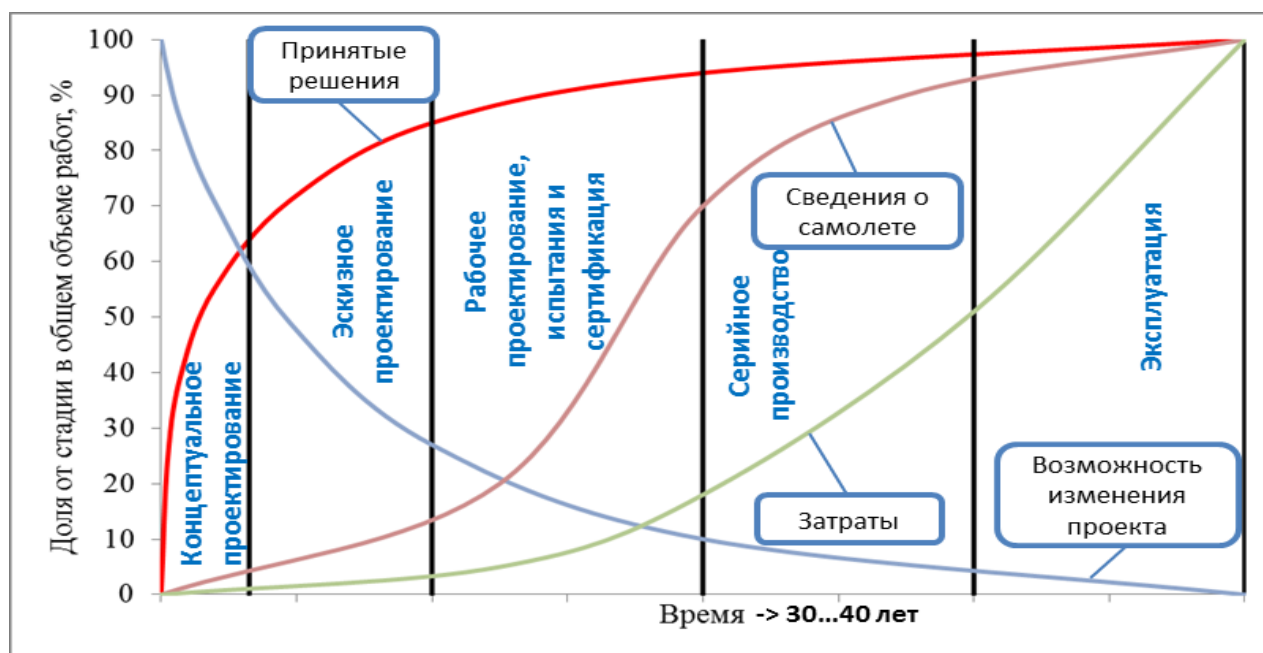


Рисунок 2 – Жизненный цикл самолета

*Под концептуальным обликом самолета* понимается синтез внешней формы, размеров и взаимного расположения агрегатов самолета, определяющих его летно-технические, эксплуатационные и экономические характеристики. В коммерческой авиации особую роль при проработке технического предложения играют выявление и удовлетворение экономических потребностей потенциального заказчика самолета.

В настоящее время не известны методы оценки экономической эффективности КТРГС на рынке чартерных грузовых перевозок. В связи с этим при концептуальном проектировании коммерческого транспортного самолета, в особенности тяжелого рампового, возникла необходимость в создании *методики*, позволяющей:

- выбирать наиболее оптимальные конструктивные решения и проектные параметры для возможных вариантов самолета;

- определять летно-технические и экономические характеристики проектных вариантов;
- объективно оценивать разработанные варианты КТРГС с точки зрения их коммерческой привлекательности;
- сравнивать выбранный вариант самолета с возможными конкурентами, учитывая его технико-экономические преимущества и прогнозируемые сценарии развития рынка авиационных грузоперевозок.

**Анализ научной литературы** показал, что проблемы проектирования транспортных самолетов затрагиваются в работах отечественных и зарубежных специалистов:

- О.К. Антонова и В.И. Толмачева, в работах которых рассмотрены основные аспекты общего и весового проектирования РГС, их место в транспортной структуре и перспективы развития, а также проведена классификация грузов, перевозимых на данном типе ВС;

- С.М. Егера и Н.К. Лисейцева, в трудах которых рассмотрены особенности проектирования фюзеляжей ГС;

- Г.В. Новожилова, И.Я. Катyreва, М.С. Неймарка, в работах которых описаны вопросы экономической эффективности самолетов и методов сравнительной оценки вариантов;

- J. Roskam и E. Torenbeek, в работах которых рассмотрены основные особенности конструкции фюзеляжа и аэродинамики ТС, описаны методы расчета эксплуатационных расходов и стоимости создания самолета;

- Terrence A. Weisshaar, R.G. Smethers, J.C. Muehlbauer, M. Hepperle, в трудах которых предложены варианты облика перспективных транспортных самолетов.

Создание КТРГС вносит в процесс проектирования ряд особенностей, которые недостаточно освещены в существующих трудах отечественных и зарубежных авторов.

Место настоящей работы заключается в создании методики оценки влияния рынка грузовых перевозок на концептуальный облик КТРГС.

**Целью диссертационной работы** является разработка методики определения рационального облика коммерческого тяжелого рампового грузового самолета

(КТРГС) из условия его прибыльности, составляющей **научно-методическое обеспечение (НМО)** процесса концептуального проектирования.

В качестве основного критерия оценки конструкторских решений в настоящем НМО предлагается использовать **прибыль (П)** производителя и эксплуатанта. Этот критерий показывает, будет ли проект данного самолета приносить прибыль на рынке грузовых авиаперевозок.

Изучение рынка авиационных перевозок позволяет определить требуемые эксплуатационные качества самолета, такие как: массу полезной нагрузки, характеристики базирования, габариты и основные свойства грузовой кабины, размер и расположение грузовых люков. Эти параметры влияют не только на стоимость производства и эксплуатации КТРГС, но и на прибыль от авиаперевозок.

Для достижения цели диссертационной работы поставлены и решены следующие **задачи**:

- сформулированы требования к КТРГС на основе анализа рынка существующих транспортных самолетов;
- на основе анализа требований предложены варианты концептуальных обликов КТРГС для среднесрочной и долгосрочной перспективы;
- разработаны математические модели для определения концептуального облика КТРГС и расчета его характеристик;
- определены рациональные по критерию прибыли параметры КТРГС.

**Объектом исследования** является концептуальный облик коммерческого рампового тяжелого транспортного самолета для перевозки широкой номенклатуры грузов различного типа, размеров и назначения.

**Предметом исследования** является методика, позволяющая выбрать наиболее рациональные параметры коммерческого тяжелого транспортного самолета на этапе концептуального проектирования из условия его прибыльности.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- определена функциональная связь между параметрами КТРГС и прибылью от его эксплуатации на рынке авиационных грузоперевозок;
- обоснован единый критерий (прибыль), позволяющий оценивать технические и экономические параметры КТРГС и их максимальное соответствие рынку;

- уточнена методика весового и аэродинамического проектирования самолета с учетом особенностей КТРГС;
- разработано научно-методическое обеспечение процесса концептуального проектирования;
- сформирована концепция развития перспективных транспортных самолетов.

### **Практическая значимость.**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для:

- определения рационального варианта КТРГС для разработки эскизного проекта;
- оценки объемов производства и экономической эффективности перспективного самолета по сравнению с существующими и проектируемыми аналогами;
- обоснования конкурентоспособности выбранного концептуального облика перспективного КТРГС;
- определения областей применения проектируемого КТРГС на рынке грузоперевозок;
- обучения специалистов по общему проектированию в авиационных вузах.

**Достоверность полученных результатов** определяется данными верификационных исследований, которые заключались в сравнении фактических характеристик существующих тяжелых транспортных самолетов с рассчитанными при помощи разработанного НМО. При этом отклонение в значениях расчетных и реальных характеристик не превышает  $\pm 5\%$ .

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях, входящих в перечень изданий, рецензируемых ВАК. Основные положения работы были доложены и обсуждены на пленарных заседаниях двух международных авиационных форумов:

- Международном авиатранспортном форуме МАТФ-2014. Доклад на тему «Перспективный транспортный самолет»;
- Международном авиационно-космическом салоне МАКС-2015. Доклад на тему «Особенности создания перспективного транспортного самолета для чартерных грузовых перевозок».

**Личный вклад соискателя.** Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором либо при его непосредственном участии.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа изложена на 252 машинописных листах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений, сокращений и терминов, библиографического списка из 90 наименований, а также 4 приложений. Работа содержит 147 рисунков и 16 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** анализируются предпосылки для создания НМО исследования вариантов облика КТРГС, рассматриваются сферы его применения. Приводится краткий обзор существующих работ отечественных и зарубежных авторов по проблемам проектирования и особенностям грузовых самолетов. Обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, а также научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**Первая глава** содержит краткий обзор истории развития транспортных самолетов, современное состояние флота воздушных судов, предназначенных для транспортировки грузов различных типов, размеров и назначения. На основе обработки статистических данных по различным типам самолетов построены зависимости изменения характеристик РГС, проанализированы тенденции их развития во времени и определены требования к перспективному КТРГС.

Из числа существующих в мире тяжелых и сверхтяжелых ТС можно выделить следующие: *военно-транспортные самолеты (ВТС); рамповые грузовые самолеты (РГС); грузовые самолеты (ГС); специальные грузовые самолеты (СГС)*. Показано, что несмотря на различное назначение указанные типы самолетов часто используют универсальные технические решения. Так, если транспортный самолет является коммерческим, то его коммерческую эффективность можно увеличить расширением серии подобных машин за счет создания военно-транспортной или пассажирской версии.

В зависимости от достижений научно-технического прогресса в области транспортных самолетов можно рассматривать КТРГС среднесрочной (6-15 лет) и долгосрочной (20-30 лет) перспективы.



Предполагается, что в среднесрочной перспективе для КТРГС основной будет нормальная аэродинамическая схема с толстым (относительной толщиной 12...13%) сверхкритическим крылом большого удлинения (9 и более) умеренной стреловидности (около  $25^0$ ). Такое крыло дает возможность минимизировать массу самолета и применить относительно простую и легкую механизацию, например, однощелевой или двухщелевой выдвижной закрылок, обеспечивая при этом хорошие крейсерские и взлетно-посадочные характеристики. В качестве силовой установки в среднесрочной перспективе для КТРГС могут использоваться двухконтурные турбореактивные двигатели со степенью двухконтурности  $m \approx 8 \dots 12$  и сравнительно малыми расходами топлива. Масса конструкции планера может быть снижена путем широкого применения композиционных материалов.

Создание КТРГС на долгосрочную перспективу потребует от конструкторов качественно новых решений во всех областях. В транспортной авиации возможны интегральные аэродинамические компоновки, в т.ч. типа «летающее крыло». Кроме этого можно ожидать применения распределенных силовых установок и новых видов топлива. Современные исследования показывают возможность уменьшения сопротивления аэродинамического трения на крейсерском режиме полета путем управления пограничным слоем, что позволит увеличить аэродинамическое качество. Применение композиционных материалов в КТРГС долгосрочной перспективы может достичь 55...60% массовой доли конструкции.

**Вторая глава** посвящена описанию функциональных зависимостей, на основе которых построены математические модели описания технических параметров КТРГС. На основе этих зависимостей в среде табличного процессора MS Excel построена система автоматизированного расчета.

При разработке моделей расчета технических параметров использован блочный (модульный) принцип (рисунок 3).

Преимуществами такого принципа являются:

- возможность параллельной разработки блоков специалистами или группами специалистов, компетентными в соответствующих областях;
- возможность доработки блоков или добавления новых блоков без изменения глобальной математической модели самолета.

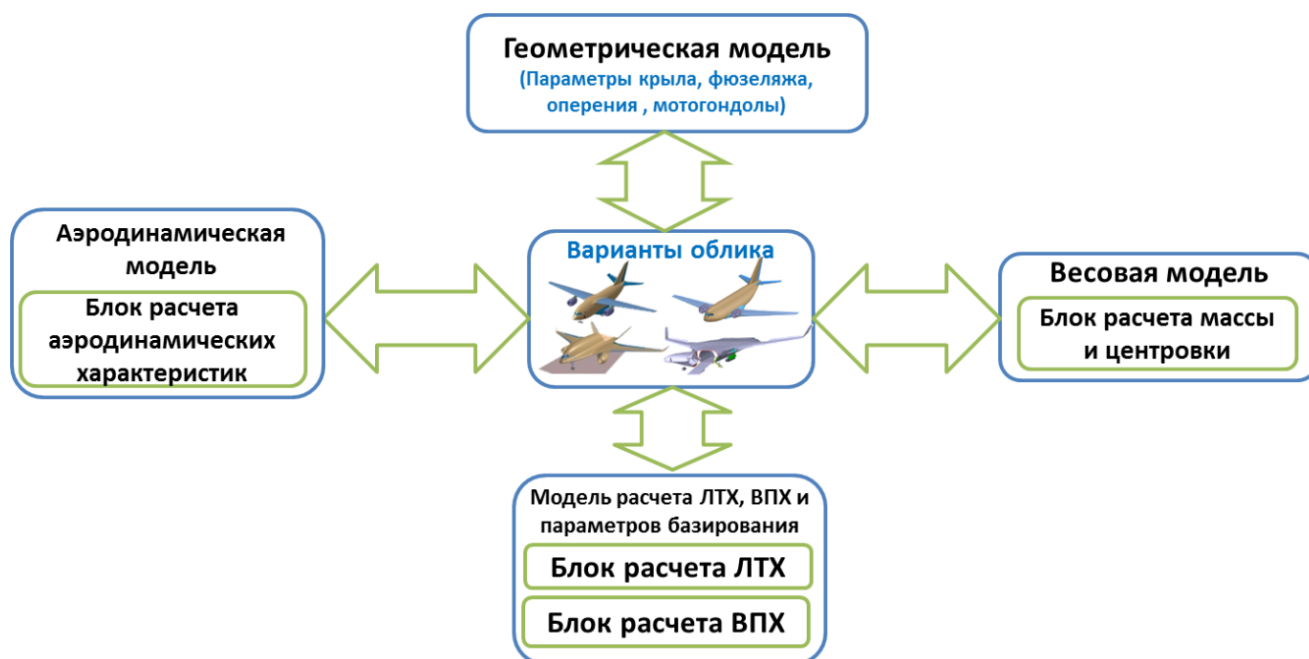


Рисунок 3 – Структурная схема математических моделей

Из числа тематических блоков можно выделить следующие математические модели описания технических параметров в порядке их расчета:

- *геометрическая модель*, описывающая связь между структурой размещения целевой нагрузки и обликом самолета, а также его основные геометрические параметры, которые являются входными данными для других моделей;
- *массовая (весовая) модель*, описывающая через систему соотношений связь между обликом самолета и массой его конструкции и отдельных частей;
- *аэродинамическая модель*, связывающая геометрические параметры самолета (его концептуальный облик) с аэродинамическими характеристиками (АДХ);
- *модель расчета ЛТХ и ВПХ*, объединяющая аэродинамические и массовые параметры самолета с этими характеристиками.

**Геометрическая математическая модель** представляет собой описание размерных и безразмерных параметров, в целом определяющих облик летательного аппарата (ЛА). Она включает в себя геометрическую информацию, в том числе:

- форму и размеры агрегата;
- взаимное расположение данного агрегата относительно других;
- количество агрегатов рассматриваемого типа на ЛА;
- характерные признаки агрегата (тип оперения или шасси, тип сечения фюзеляжа и др.).

**Массовая математическая модель** представляет собой комплекс зависимостей, на основе которых рассчитывается масса пустого снаряженного

самолета. Базой для построения модели являются полуэмпирические модели В.М. Шейнина, С.М. Егера, А.В. Лебедева, Э. Торенбика и др., построенные путем обработки статистических данных по массе агрегатов пассажирских самолетов (ПС) и ТС. В настоящей математической модели расчёт массы фюзеляжа осуществляется поэлементно. С точки зрения функционального назначения особым агрегатом планера РГС является фюзеляж, в котором присутствуют рампы, отклоняемые части, вырезы и усиления под грузовые люки, сочлененных между собой.

Особое внимание уделено расчету массы грузового пола  $m_{пол}$  РГС, так как этот агрегат фюзеляжа является одним из основных конструкций РГС.

Показано, что масса грузового пола РГС зависит в основном от ширины. В РГС, предназначенных для перевозки нестандартных грузов и самоходной колесной и гусеничной техники, нагрузка по длине и ширине грузового пола часто является сосредоточенной, что приводит к большему увеличению удельной массы пола по его ширине (рисунок 4). Масса пола может быть определена по формуле

$$m_{пол} = S_{гп} \cdot (9 \cdot B_{гп} + 4),$$

где:  $S_{гп}$  – площадь поверхности грузового пола,

$B_{гп}$  – ширина грузового пола.

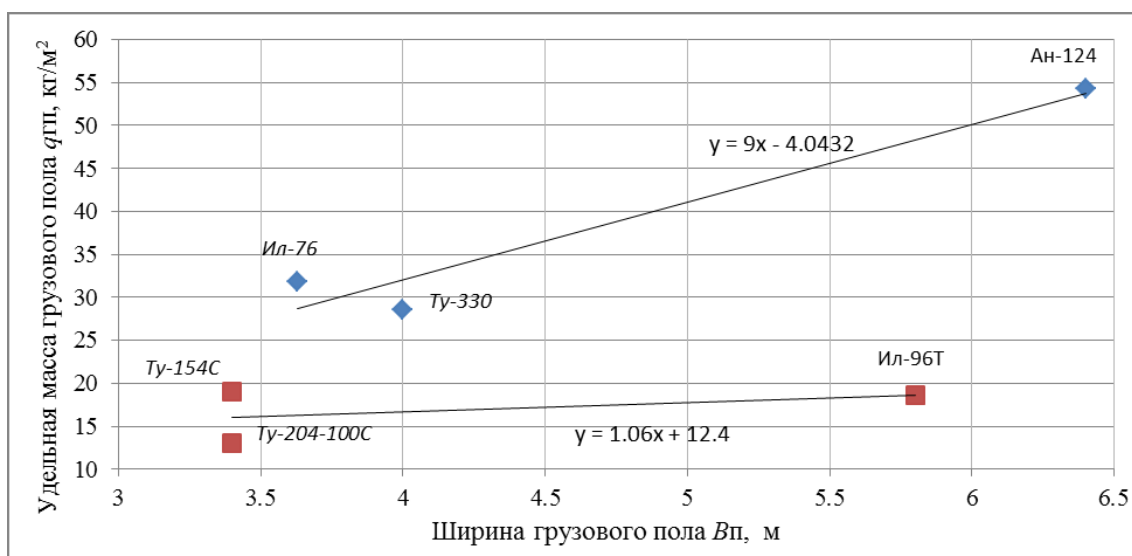


Рисунок 4 – Зависимость удельной массы пола от его ширины

Другим важным агрегатом ТС являются грузовые рампы для погрузки техники и грузовые люки. Для расчета массы задней и передней рампы была получена следующая зависимость

$$m_{рампы} = S_{рампы} \cdot (85.43 \cdot \ln(q_{рампы}) + 425.25),$$

где:  $S_{рампы}$  – площадь поверхности рампы, м<sup>2</sup>;

$q_{рампы}$  – удельная нагрузка на рампу, кг/м<sup>2</sup>.

Масса створок хвостового грузового люка РГС (рисунок 5) рассчитывается по статистической формуле

$$m_{гс} = 48 \cdot S_{гс},$$

где  $S_{гс}$  – поверхность грузовых створок,  $m^2$ .

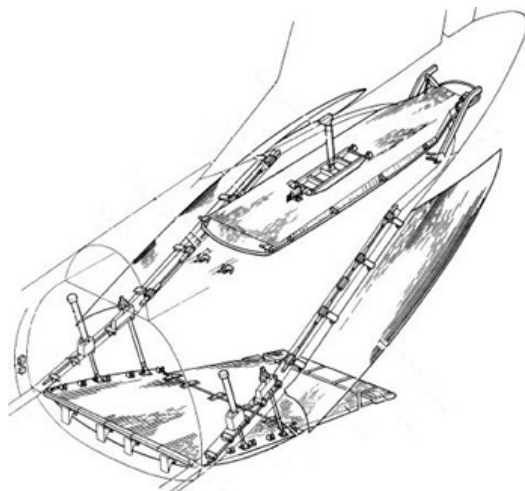


Рисунок 5 - Грузовые хвостовые створки РГС

При наличии отклоняемых носовой или хвостовой частей масса усиления, необходимых для их устройства, может быть вычислена как

$$m_{упч} = k_{упч} \cdot m_{пч}$$

где:  $m_{пч}$  – масса поворотной (отклоняемой) части фюзеляжа;

$k_{упч}$  – коэффициент, учитывающий тип навески поворотной (отклоняемой) части фюзеляжа ( $k_{упч}=0.2$  при отклонении вбок,  $k_{упч}=0.3$  при отклонении вверх, (рисунок 6)).

Масса  $m_{пч}$  рассчитывается как сумма массы конструкции в зависимости от площади ее омываемой поверхности  $S_{ом.пч}$  и массы находящихся в ней оборудования и систем.

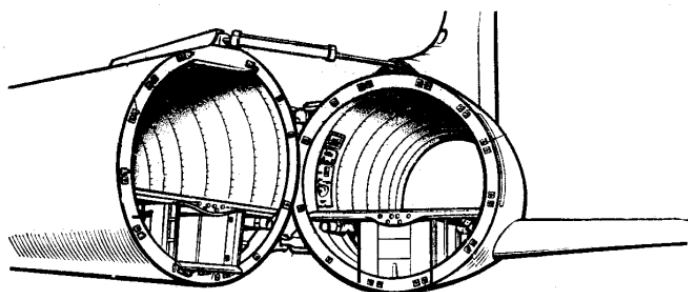


Рисунок 6 – отклоняемые части фюзеляжа ТС

**Аэродинамическая математическая модель** основана на работах Г. Шлихтинга, С.М. Белоцерковского, Г.С. Бюшгенса, Г.А. Юдина, В.А. Барина. Она позволяет на основе характеристик геометрической модели определить аэродинамическое сопротивление и аэродинамическое качество на крейсерском режиме полета. Для построения некоторых аэродинамических зависимостей

проведены расчеты различных компоновок и вариантов облика в программах и программных комплексах, таких как XFOIL, AVL, FlowVision.

Расчет аэродинамической модели проводился методом деления планера на агрегаты, аэродинамическое сопротивление каждого из которых определялся отдельно.

Как правило, фюзеляжи РГС, имеют хвостовые части, сильно отличающиеся по форме от тела вращения из-за большого отгиба вверх и уплощения (рисунок 7), что является необходимым для обеспечения погрузки и выгрузки.

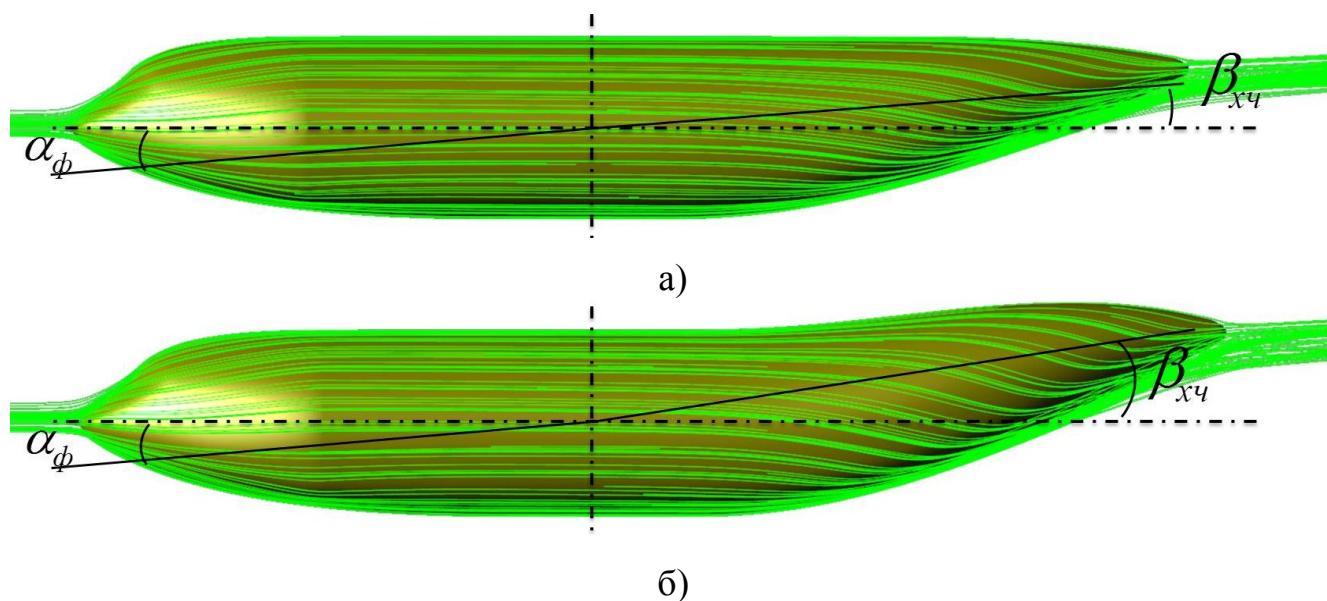


Рисунок 7 - Линии тока на фюзеляжах с углами отгиба хвостовой части  $\beta_{xc}$  :

а) -  $\beta_{xc} = 6^{\circ}$ , б) -  $\beta_{xc} = 10^{\circ}$

В результате численных исследований в программном комплексе FlowVision выявлено соотношение для коэффициента формы фюзеляжа  $k_{\phi}$ , от которого зависит профильное сопротивление фюзеляжа  $c_{p\phi}$  и соответственно коэффициент сопротивления фюзеляжа  $c_{x\phi}$ .

$$k_{\phi} = 1 - 8 \cdot 10^{-5} (\beta_{xc} - 0.8 \cdot \alpha_{\phi})^4 + 1.9 \cdot 10^{-3} (\beta_{xc} - 0.8 \cdot \alpha_{\phi})^3 - 7.5 \cdot 10^{-3} (\beta_{xc} - 0.8 \cdot \alpha_{\phi})^2 + 10^{-2} (\beta_{xc} - 0.8 \cdot \alpha_{\phi})$$

где:  $\beta_{xc}$  – угол отгиба хвостовой части фюзеляжа;

$\alpha_{\phi}$  – угол атаки фюзеляжа относительно строительной горизонтали фюзеляжа.

**Модель расчета ЛТХ и ВПХ** позволяет на этапе концептуального проектирования с достаточной точностью оценить эти характеристики КТРГС. Для расчета потребной длины взлетно-посадочной полосы  $L_{ВПП}$  разработаны упрощенные зависимости на основе статистических и расчетных данных по различным типам механизации крыла.

Верификация расчетных моделей показала приемлемую сходимость значений технических характеристик с рассчитанными по описанным выше моделям (рисунки

8-9). Из графиков видно, что точность расчета для большинства ТС и ПС составляет  $\pm 5\%$ , что на этапе концептуального проектирования является приемлемым результатом.

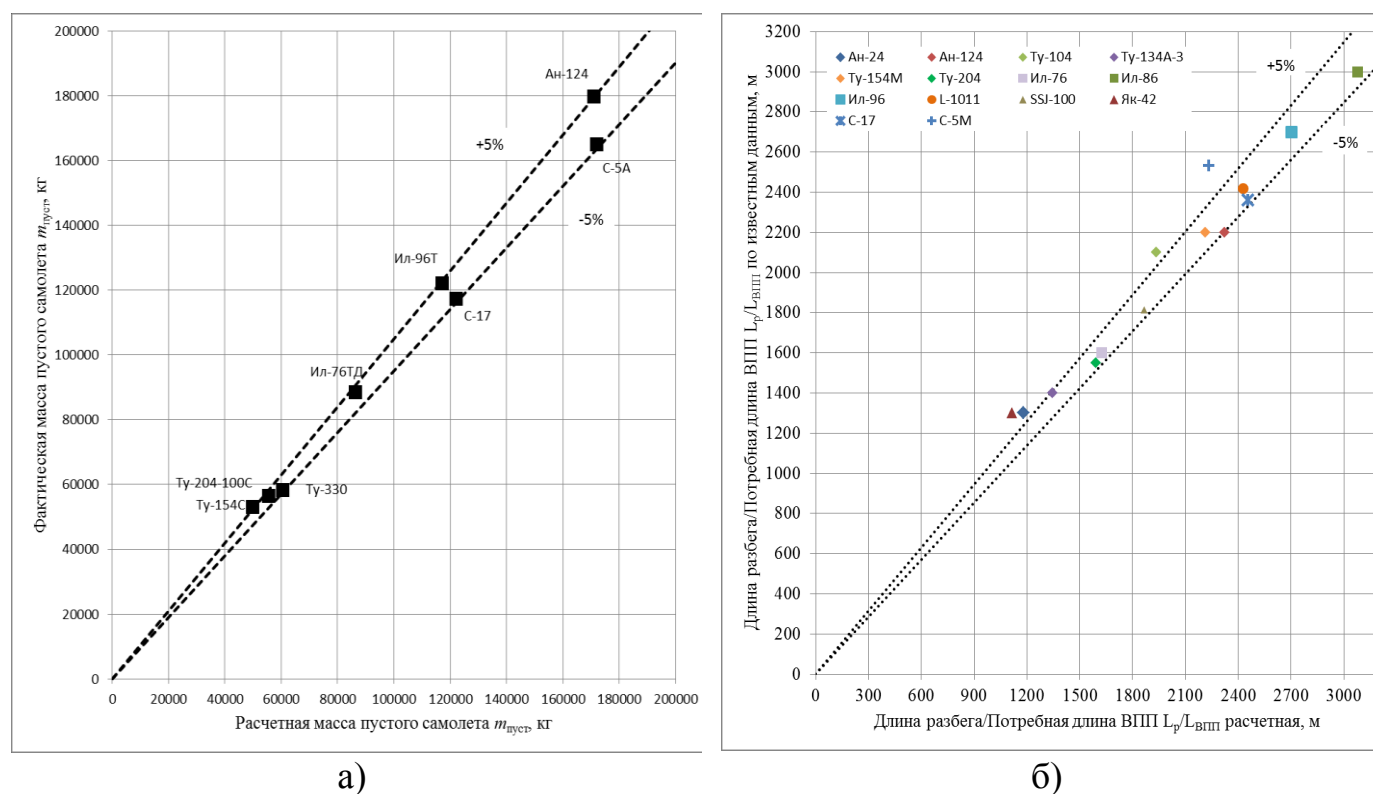


Рисунок 8 - Сравнение расчетных и фактических данных: а) - по массе, б) - длине разбега или потребной длине ВПП

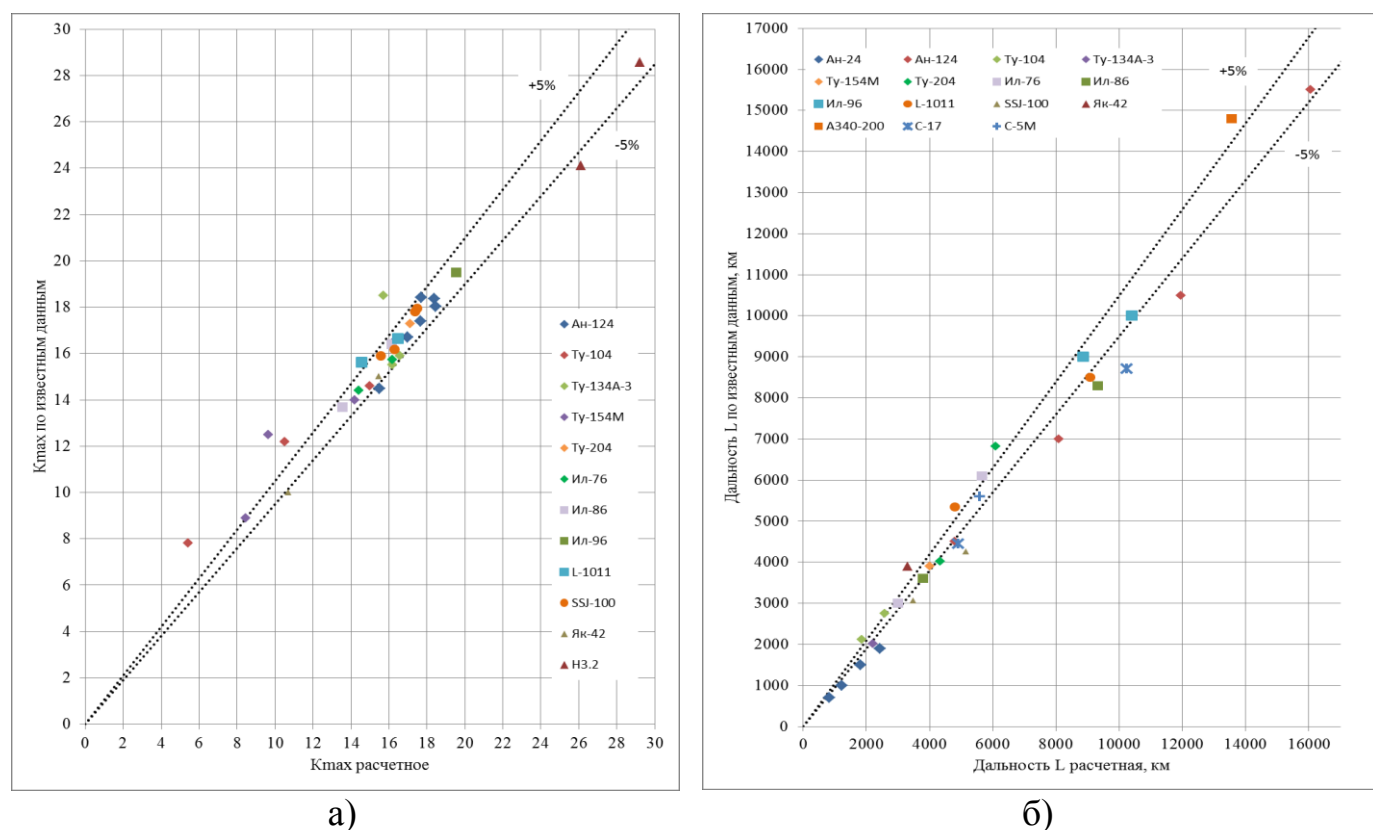


Рисунок 9 - Сравнение расчетных и фактических данных: а) - по максимальному аэродинамическому качеству, б) - по дальности полета

**В третьей главе** представлено описание процесса концептуального проектирования, в ходе которого производится поиск наилучшего решения транспортной задачи, создаются варианты концептуальных обликов КТРГС.

Основными задачами концептуального проектирования являются:

- обоснование потребности в создаваемом КТРГС;
- выбор размерности перспективного КТРГС;
- анализ наивыгоднейшего сочетания областей применения КТРГС, требуемых технических и эксплуатационных характеристик, которые дадут возможность охватить наибольшую долю рынка авиационных перевозок;
- обоснование предложения для эскизного проектирования.

В качестве критерия оценки вариантов облика КТРГС на стадии концептуального проектирования предложено использовать прибыль  $\Pi$  от выполнения коммерческим парком этих самолетов (с требуемой численностью) коммерческой работы, обусловленной объемом рынка за весь прогнозируемый период программы самолета.

$$\Pi [\text{Прибыль}] = B [\text{Выручка}] - C [\text{Стоимость}],$$

где:  $B$  – совокупная выручка от всех сегментов рынка авиаперевозок, на которых предполагается использовать самолет за прогнозируемый период программы эксплуатации парка. К данным сегментам относятся: рынок грузов общего назначения (генеральные грузы), рынок нестандартных грузов, а также рынок уникальных негабаритных грузов;

$C$  – совокупная стоимость всех этапов жизненного цикла самолета, в том числе проектирования, производства, эксплуатации, утилизации.

Предлагаемый критерий оценки облика КТРГС обладает следующими особенностями.

Во-первых, прибыль характеризует проектируемый КТРГС как с позиции производителя, так и с позиции эксплуатанта, интересы которых могут противоречить друг другу, а именно производителю авиационной техники выгодно продать свой продукт как можно дороже, авиакомпании же важно наряду с минимально возможными эксплуатационными расходами приобрести КТРГС по минимальной цене. При этом именно цена серийного самолета является величиной, наименее поддающейся прогнозу, так как во многом зависит от различных



конъюнктурных факторов. Однако при формировании экономического критерия  $\Pi$  цена самолета исключается из рассмотрения следующим образом:

$$\Pi = \Pi - C_{\text{проект}} - C_{\text{произ}} + B - \Pi - C_{\text{экспл}} = B - C,$$

где:  $\Pi$  – цена рассматриваемого парка КТРГС;

$C_{\text{проект}}$  – стоимость проектирования парка КТРГС;

$C_{\text{произ}}$  – стоимость производства парка;

$B$  – совокупная выручка от эксплуатации парка КТРГС;

$C_{\text{экспл}}$  – стоимость эксплуатации парка КТРГС;

$C = C_{\text{проект}} + C_{\text{произ}} + C_{\text{экспл}}$  – стоимость жизненного цикла парка КТРГС.

Во-вторых, особенностью предлагаемого подхода к оценке вариантов проектируемого КТРГС является прямая связь с рынком перевозок авиационных грузов через показатель совокупной выручки  $B$ , которая дает возможность на основе анализа и прогнозирования объемов коммерческой работы в различных сегментах грузоперевозок варьировать первоначальными техническими требованиями и характеристиками проектируемого КТРГС для создания самолета, наиболее полно отвечающего потребностям рынка.

Для расчета критерия  $\Pi$  создано НМО на основе математических моделей. Структурная схема НМО представлена на рисунке 10.

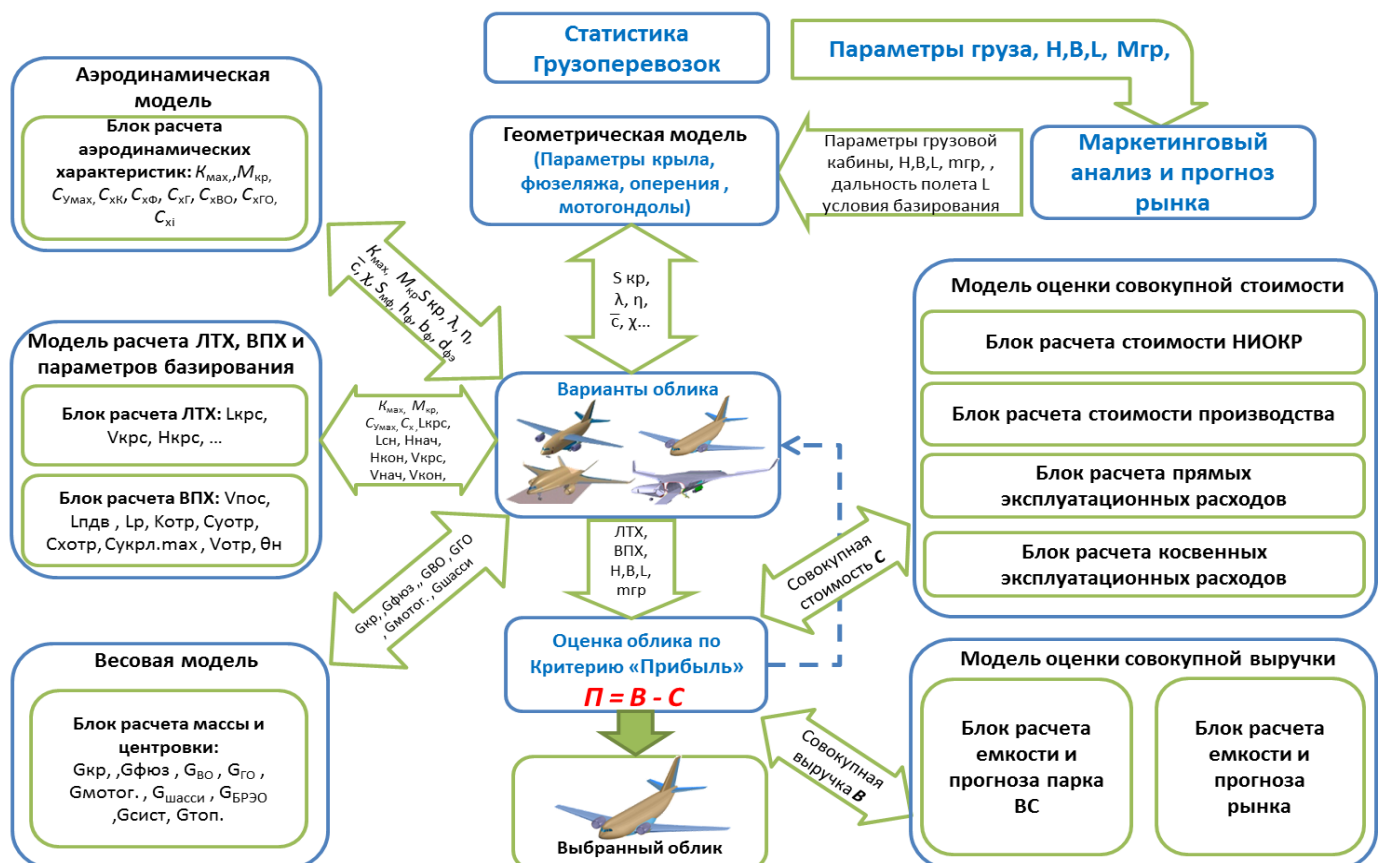


Рисунок 10 – Структурная схема НМО



Описанные математические модели реализованы в расчетном файле с использованием функциональных возможностей программного продукта MS Excel и входящего в него языка программирования Visual Basic for Applications.

Верификация прогнозных данных емкости рынка показала, что максимальное расхождение составляет не более 13%, среднегодовое отклонение составляет 7%, т.е. менее 10%, что является приемлемым на этапе концептуального проектирования.

Для учета влияния технических характеристик проектируемого КТРГС на выручку  $B$  принят коэффициент  $k_{\text{выр}}$ , рассчитанный путем статистической обработки данных грузоперевозок авиакомпании «Волга-Днепр» в различных сегментах рынка. Данные вводятся в общий расчетный файл MS Excel в виде, показанном в таблице 1.

Таблица 1 – Общий вид статистической базы данных грузоперевозок

№ рейса	$L^i$ , км	$N_{\text{ост}}^i$	$m_{\text{гр}}^i$ , кг	$m_{\text{моногр}}^i$ , кг	$L_{\text{гр}}^i$ , мм	$B_{\text{гр}}^i$ , мм	$H_{\text{гр}}^i$ , мм	Тип
1	4720	1	$105 \cdot 10^3$	2500	1500	1300	800	ГГ
...								
$i$								

где:  $m_{\text{гр}}^i$  – общая масса груза, перевезенного за рейс;

$m_{\text{моногр}}^i$  – масса моногруза (или единицы груза), перевезенного за рейс;

$L_{\text{гр}}^i$  – наибольшая длина груза в данном рейсе;

$B_{\text{гр}}^i$  – наибольшая ширина груза в данном рейсе;

$H_{\text{гр}}^i$  – наибольшая высота груза в данном рейсе;

$L^i$  – дальность рейса.

Тип – параметр классификации перевозимого груза, принимающий следующие дискретные значения: ГГ – генеральный груз, УНГ – уникальный негабаритный груз, НГ – нестандартный груз.

Параметры проектируемого самолета задаются или рассчитываются в группе математических моделей проектных параметров (в геометрическом и блоках ЛТХ и ВПХ). К этим параметрам относятся:  $L_{\text{гк}}$  – длина грузовой кабины, мм;  $B_{\text{гк}}$  – ширина грузовой кабины, мм;  $H_{\text{гк}}$  – высота грузовой кабины, мм;  $a$  – минимальный зазор между грузом и конструкцией грузового отсека, а также между грузами, мм;  $m_{\text{гр}}$  – максимальная грузоподъемность перспективного самолета, кг.

Далее в автоматическом режиме для каждого рейса определяются коэффициенты вместимости по длине  $K_l^i$ , ширине  $K_b^i$ , высоте  $K_h^i$ , массе  $K_m^i m_{\text{гр}}$  груза,

характеризующие рассматриваемый облик проектируемого транспортного самолета по возможности перевезти груз  $i$ -го рейса из таблицы 1.

$$K_l^i = \frac{(L_{ГК} - a)}{(L_{зр}^i + a)}; K_b^i = \frac{B_{ГК} - a}{B_{зр}^i + a}; K_h^i = \frac{H_{ГК}}{(H_{зр}^i + a)}; K_{m_{зр}}^i = \frac{m_{зр}}{m_{зр}^i}.$$

Из расчета коэффициентов вместимости рассчитываются соответствующие коэффициенты возможности совершения  $i$ -го рейса по:

- длине груза  $l^i = 1$  если  $K_l^i \geq 1$  и  $l^i = 0$  если  $K_l^i \leq 1$ ;
- ширине груза  $b^i = 1$  при  $K_b^i \geq 1$ , и  $b^i = 0$  при  $K_b^i \leq 1$ ;
- высоте груза  $h^i = 1$  при  $K_h^i \geq 1$ , и  $h^i = 0$  при  $K_h^i \leq 1$ ;
- массе груза  $m^i = 1$  при  $K_{m_{зр}}^i \geq 1$  и  $m^i = 0$  при  $K_{m_{зр}}^i \leq 1$ .

Далее вычисляется суммарная дальность для расчета совокупной выручки от эксплуатации проектируемого КТРГС  $L_{выр}$ , представляющая сумму дальностей всех рейсов из таблицы 1, которые могут быть осуществлены, исходя из транспортных возможностей разрабатываемого КТРГС.

$$L_{выр} = \sum_{i=1}^n h^i \cdot b^i \cdot l^i \cdot m^i \cdot L^i.$$

Окончательно выражение для коэффициента выручки имеет вид

$$k_{выр} = \frac{L_{выр}}{\sum_{i=1}^n L^i}.$$

По спрогнозированной емкости рынка  $E_{(t)}$  и коэффициенту  $k_{выр}$  определяется суммарная выручка  $B$ , которую может принести парк самолетов с определенными техническими характеристиками. Упрощённо можно написать

$$B_{k(t)} = \Sigma E_{(t)} \cdot k_{выр} \cdot T_k^{л.ч.}_0 \cdot K_{инд(t)}^{л.ч.},$$

где:  $E_{(t)}$  – емкость рынка грузовых авиаперевозок в каждый год периода эксплуатации  $t$ , л.ч.;

$k_{выр}$  – коэффициент выручки, определяемый техническими характеристиками самолета;  $T_k^{л.ч.}_0$  – тариф на стоимость летного часа в начале периода эксплуатации  $t$ , \$/л.ч.;  $K_{инд(t)}^{л.ч.}$  – коэффициент индексации тарифа  $T_k^{л.ч.}_0$  в каждый год периода эксплуатации  $t$ .

Математическая модель расчета совокупной стоимости жизненного цикла  $C$  основана на работе Я. Роскама (Dr. Jan Roskam, Airplane design, 1985) с некоторыми модификациями, учитывающими специфику тяжелых ТС. Основным модификациям подвергся блок расчета прямых эксплуатационных расходов (ПЭР). Аналогично

коэффициенту  $k_{\text{выр}}$  был принят коэффициент  $k_{\text{стоим}}$ , характеризующий ПЭР на совершение транспортных операций из таблицы 1.

$$k_{\text{стоим}} = \frac{L_{\text{стоим}}}{\sum_{i=1}^n L^i}.$$

$L_{\text{стоим}}$  представляет собой суммарную дальность, которую необходимо преодолеть проектируемому КТРГС для выполнения коммерческой работы, представленной в таблице 1. Зависимость для расчета  $L_{\text{стоим}}$  имеет вид

$$L_{\text{стоим}} = \sum_{i=1}^n h^i \cdot b^i \cdot l^i \cdot m^i \cdot N_{\text{пол}}^i \cdot L^i,$$

где  $N_{\text{пол}}^i$  – количество полетов, необходимых для выполнения  $i$ -й транспортной операции, вычисляемое по формуле:

$$N_{\text{пол}}^i = \max\left(\left\lceil \frac{1}{K_{m_{\text{гр}}}^i} \right\rceil; \left\lceil \frac{1}{K_b^i} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{1}{K_l^i} \right\rceil\right),$$

где символ  $\lceil \rceil$  означает округление к ближайшему большему целому числу.

Например, при  $K_{m_{\text{гр}}}^i = 0.8$ ,  $K_h^i = 1$ ,  $K_l^i = 3$  и  $K_b^i = 2$   $N_{\text{пол}}^i = \max\left(\left\lceil \frac{1}{0.8} \right\rceil; \left\lceil \frac{1}{3} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{1}{2} \right\rceil\right) = (2; 1; 1)$ ,

т.е. данный самолет для  $i$ -й перевозки из таблицы 1 должен совершить два полета, и определяющим фактором здесь является его грузоподъемность.

Исходя из дальности  $L_{\text{стоим}}$  и среднего времени на выполнение транспортной операции рассчитывается количество летных часов, необходимых для выполнения работы на данном сегменте рынка. Это служит основой для определения ПЭР, включая расходы на горюче-смазочные материалы (ГСМ), экипаж, техническое обслуживание, поддержание полетов и т.д.

Сравнение расчетных и фактических значений стоимости проектирования и производства тяжелого ТС представлено на рисунке 11.

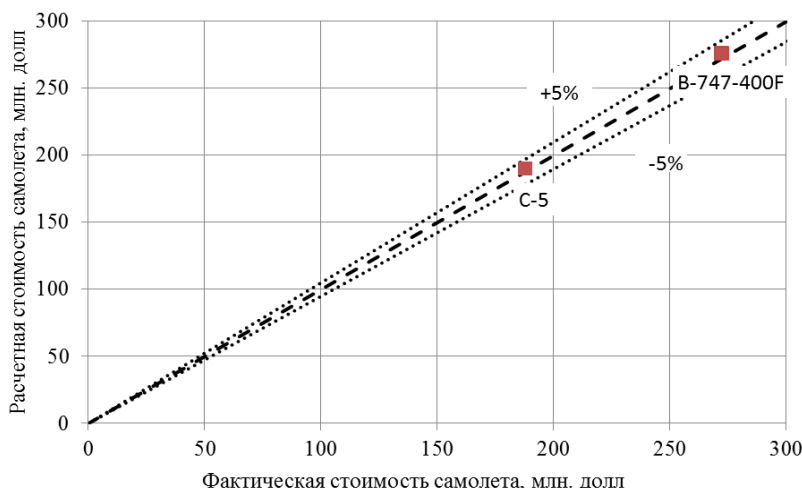


Рисунок 11 - Сравнение фактических и расчетных значений стоимости ТС

Четвертая глава посвящена проектным исследованиям и апробации НМО оценки облика коммерческого тяжелого транспортного самолета.

В качестве объектов исследования выбраны существующие самолеты: Ан-124-100, Ил-76ТД, С-17 (MD-17), В-747-400F, С-5 (L-500).

Параметрические исследования показали, что для КТРГС снижение грузоподъемности и максимальной взлетной массы по сравнению с прототипом - самолетом Ан-124-100 при сохранении численности парка может привести к увеличению  $\Pi$  (рисунок 12). Это связано с особенностями распределения грузов на сети авиаперевозок.

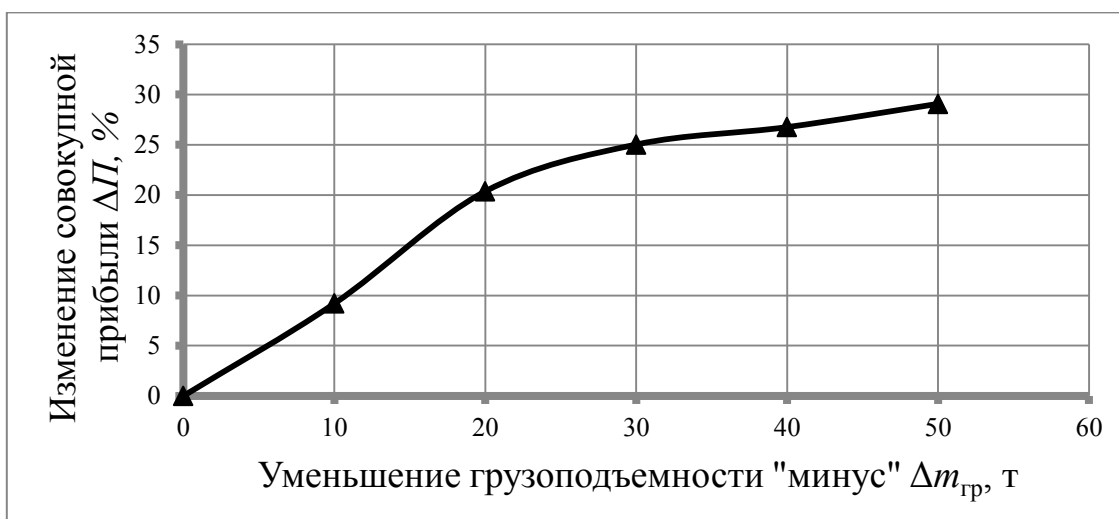


Рисунок 12 - Зависимость совокупной прибыли Ан-124-100 от уменьшения грузоподъемности

При этом уменьшение высоты  $H_{гк}$  грузовой кабины с точки зрения совокупной прибыли  $\Pi$  не целесообразно (рисунок 13).



Рисунок 13 - Зависимость совокупной прибыли Ан-124-100 при уменьшении максимальной высоты грузовой кабины

При исследовании влияния ширины грузовой кабины  $V_{гк}$  выявлено, что на зависимости  $\Pi=f(V_{гк})$  существует максимум совокупной прибыли, соответствующей  $\Delta V_{гк} = -1 \dots -1.1$  м (рисунок 14). Это связано с тем что, большая часть коммерческих грузов, приносящих максимальную прибыль, имеют ширину не более 5 м.

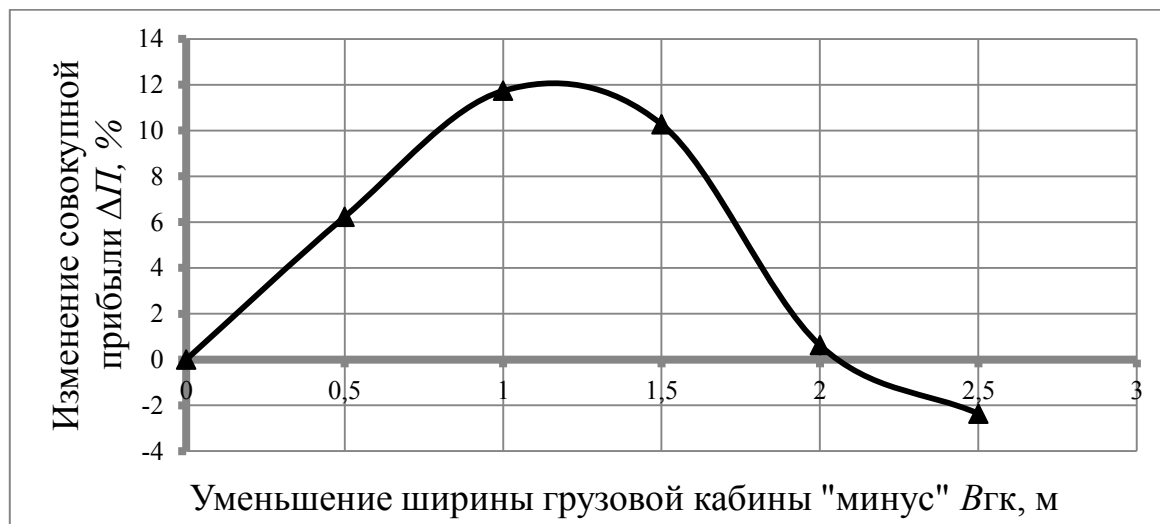


Рисунок 14 - Зависимость совокупной прибыли Ан-124-100 при уменьшении максимальной ширины грузовой кабины

Полученные результаты показывают, что для рассматриваемого рынка грузовых перевозок более эффективным может быть КТРГС с максимальной грузоподъемностью около 80 т и уменьшенной шириной грузового пола. С учетом этого сформированы требования к основным характеристикам КТРГС, и проведены проектные исследования облика КТРГС среднесрочной (рисунок 15) и долгосрочной перспектив (рисунок 16).

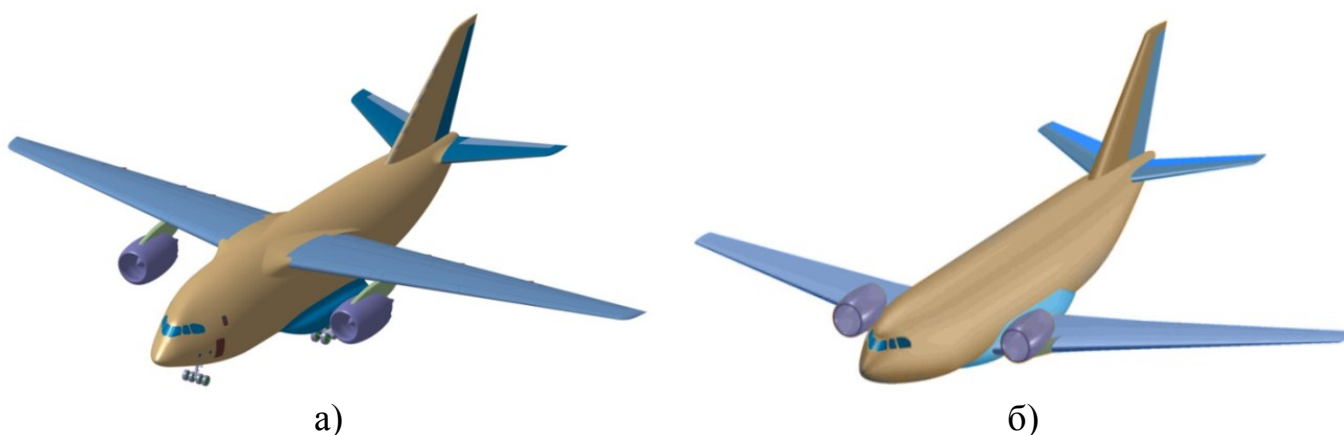
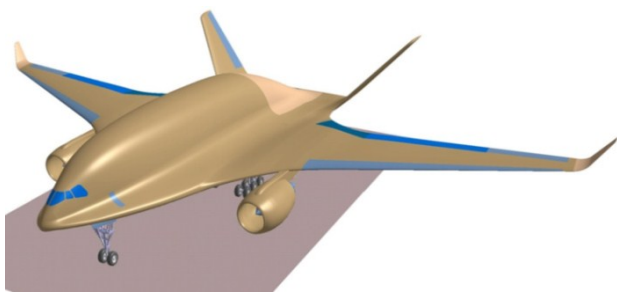
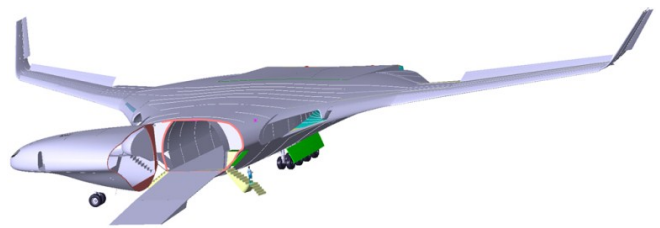


Рисунок 15 - Варианты облика КТРГС среднесрочной перспектив:

а) - ПТС-1, б) - ПТС-2



а)



б)

Рисунок 16 - Варианты облика КТРГС долгосрочной перспективы:

а) - ПТС-3, б) - ПТС-4

Для демонстрации работоспособности НМО из множества вариантов выбраны два альтернативных варианта КТРГС среднесрочной перспективы «ПТС-1» и «ПТС-2». Их расчетные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры вариантов КТРГС

Параметры	ПТС-1	ПТС-2	ПТС-3	ПТС-4
$S_{кр}, M^2$	436	440	617	860
$\lambda_{кр}$	9	9,5	8	4
$L_{кр}, M$	63	65	70	68
$L_{фюз}, M$	53,8	60	46	47
$S_{ом.сам}, M^2$	2481	2502	2837	2818
$m_0, T$	300	300	270	270
$m_{пуст}, T$	137,3	137	123,9	121,5
$m_{гр}, T$	80	80	80	80
$K_{max} (крс)$	16,3	18,1	22	24
$M_{крс}$	0,75	0,75	0,8	0,85
$L, км$	6650	7520	8400	8850
<i>Тип двигателя, <math>P_{max}, кгс</math></i>	Rolls-Royce Trent 900, 42000	Rolls-Royce Trent 900, 42000	Rolls-Royce Trent 1000, 35000	Rolls-Royce Trent 1000, 35000
<i>Потребная длина ВПП, м</i>	2600	2600	2600	2600

Совокупная прибыль самолетов, ожидаемая на своих сегментах рынка при оптимальном количестве самолетов, которое позволяет максимизировать совокупную прибыль с учетом их налета (рисунок 17). Парк из 15 ПТС-1 и ПТС-2 с учетом затрат на проектирование и производство значительно превосходит самолеты-аналоги по совокупной прибыли.

Из таблицы 2 видно, что, несмотря на лучшее аэродинамическое качество ПТС-2 по сравнению с ПТС-1, его совокупная прибыль несколько меньше (рисунок 17) из-за большей стоимости проектирования и производства в силу не изученности данной компоновки. Поэтому ПТС-1 на данный момент является более рациональным вариантом.

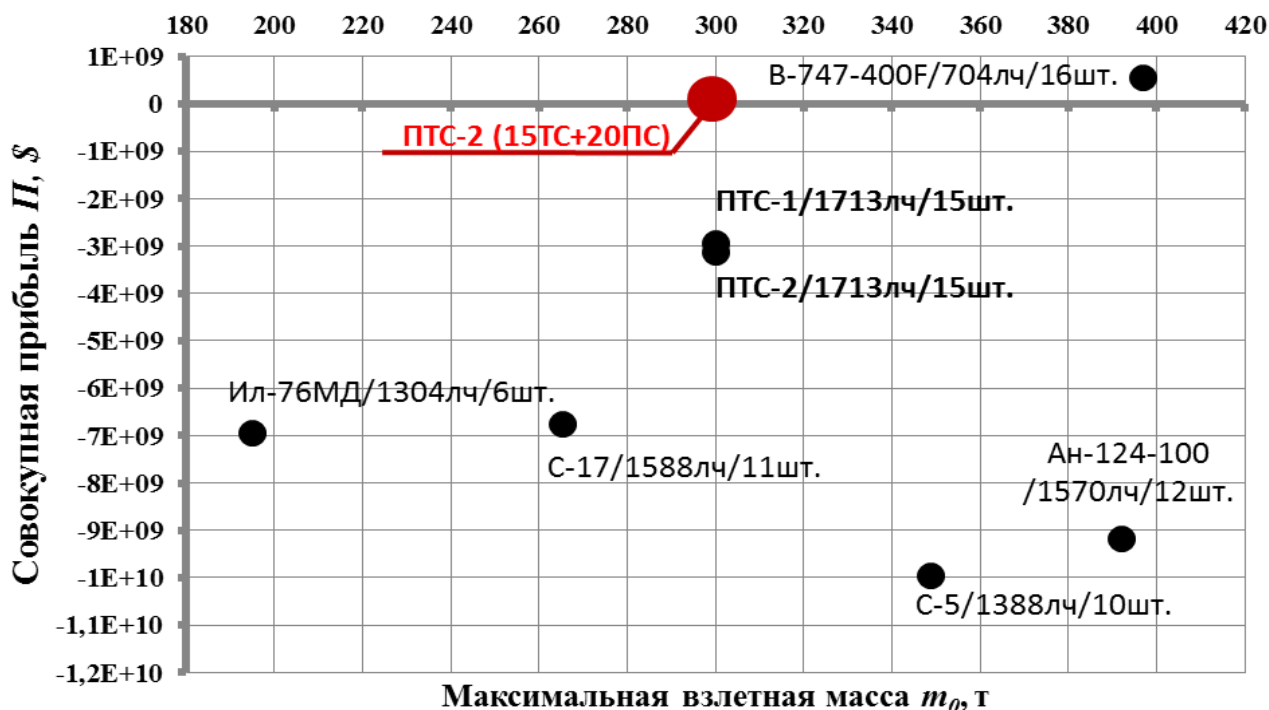


Рисунок 17 – Сравнение совокупной прибыли вариантов КТРГС

Следует отметить, что проект ПТС-2, благодаря применению компоновочной схемы «низкоплан», дает возможность унификации с широкофюзеляжным пассажирским самолетом. Если принять, что к серии из 15 ПТС-2 прибавить еще 20 унифицированных пассажирских версий это существенно может увеличить совокупную прибыль (рисунок 17). Для решения задачи по определению совокупной прибыли такого унифицированного самолета возможен расчет выручки с учетом прогноза потребного количества пассажирских широкофюзеляжных самолетов.

При развитии технологий и изменений потребности рынка ПТС-3 и ПТС-4 с учетом высоких характеристик аэродинамического качества и меньшего веса конструкции смогут радикально повысить эффективность транспортных самолетов. Более того, по мнению европейских экспертов, схема «летающее крыло» или «интегральная» могли бы найти применение в транспортной версии, что позволило бы в условиях эксплуатации снизить риски применения принципиально новой авиационной техники в пассажирской авиации.

## Заключение

1. Разработана методика концептуального проектирования коммерческого тяжелого рампового транспортного самолета по критерию его прибыльности на рынке грузовых перевозок.
2. Показано, что прибыль является критерием, позволяющим оценивать технические и экономические параметры КТРГС и их соответствие рынку.
3. По критерию рыночной прибыли определены рациональные параметры КТРГС, и сформулированы требования к коммерческому перспективному транспортному самолету. Исследования показали, что наибольшую прибыль в коммерческой эксплуатации обеспечивают КТРГС с максимальной грузоподъемностью 80...90 т, длиной грузовой кабины 24...26 м, шириной 5.3...5.4 м, высотой  $\geq 4.4$  м.
4. Разработаны математические модели (геометрическая, весовая, аэродинамическая, ЛТХ и ВПХ, экономическая) и система автоматизированного расчета проектных вариантов. Верификация математических моделей показала приемлемую сходимость расчетных и фактических значений характеристик. Точность расчета составляет  $\pm 5\%$ , что соответствует потребностям концептуального проектирования.
5. Разработаны альтернативные варианты КТРГС на основе предложенной методики. Проведено их сравнение, составлены рекомендации по проектированию перспективных транспортных самолетов, отвечающих технологическим требованиям различного уровня.
6. Показано, что увеличению прибыли могут способствовать как выбор универсальной конфигурации самолета, так и унификация КТРГС с пассажирской модификацией, позволяющей расширить объемы серийного производства и продаж.



**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в изданиях, входящих в список ВАК**

1. Карасев Д.А., Арутюнов А.Г., Загордан А.А. К вопросу создания магистральных транспортных самолетов с электрическими силовыми установками. Вестник Московского авиационного института. 2015. т. 22. №1.
2. Арутюнов А.Г., Кривиченко Я.О., Медведев А.С., Орлов В.С. Архитектура комплекса бортового оборудования перспективного транспортного самолета. Вестник Московского авиационного института. 2016. т.23. №2.
3. Арутюнов А.Г., Дыдышко Д.В., Кузнецов К.В. История развития транспортных самолетов. Труды МАИ. 2016. №89. – Режим доступа: [https://www.mai.ru/upload/iblock/1fb/arutyunov\\_dydyshko\\_kuznetsov\\_rus.pdf](https://www.mai.ru/upload/iblock/1fb/arutyunov_dydyshko_kuznetsov_rus.pdf)
4. Арутюнов А.Г., Дыдышко Д.В., Ендогур А.И., Кузнецов К.В., Толмачев В.И. Перспективы развития транспортных самолетов. Труды МАИ. 2016. №90. – Режим доступа: [https://www.mai.ru/upload/iblock/d01/arutyunov\\_dydyshko\\_endogur\\_kuznetsov\\_tolmachev\\_rus2\\_1.pdf](https://www.mai.ru/upload/iblock/d01/arutyunov_dydyshko_endogur_kuznetsov_tolmachev_rus2_1.pdf)