

УДК 627.01

## ТОЧНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

**В.А. Комаров**

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

vkomarov@ssau.ru

### Аннотация

Рассматривается новая проектная парадигма, направленная на существенное сокращение времени разработки продукции и оптимизацию ее характеристик. На основе онтологического анализа предметной области и решаемых задач обсуждаются ключевые термины и основные направления совершенствования процесса проектирования сложной наукоемкой техники. Изложение иллюстрируется примерами из самолетостроения.

**Ключевые слова:** проектирование, структура, топология, оптимизация, предсказательное моделирование, достоверность, контроль, летательный аппарат, точное попадание, concurrent design.

«Хорошо поставить вопрос – значит уже  
наполовину решить его»  
**Д.И. Менделеев**

### 1 Основные понятия

Термины «*проект*» и «*проектирование*» используются в современном научном, околонаучном и повседневном языке очень широко, и в различных контекстах они имеют свои особенности. Любопытно, что попытки автора при проведении семинаров на курсах повышения квалификации для специалистов услышать определение этих терминов от сотрудников конструкторских бюро, для которых «проект» и «проектирование» являются предметом труда, как правило, вызывают большие затруднения. В то же время этот вид деятельности является одним из основных в жизни цивилизованного сообщества людей и поэтому заслуживает глубокого изучения и постоянного совершенствования.

Отсутствие четких определений термина «проектирование» и ряда важнейших понятий, связанных с ним, сдерживает развитие этого вида деятельности как науки. Первые попытки научного подхода к проектированию можно найти уже в XVII веке. Например, еще в 1638 году Галилей рассматривал ряд задач о рациональном распределении материала в балках. Во второй половине XX века появилась серия книг и статей, посвященных осмыслению этого вида человеческой деятельности [1]. В книге [2] можно найти более десятка определений проектирования. Этот всплеск публикаций в какой-то мере можно увязать с появлением вычислительной техники, которое ускорило процесс перерастания проектирования из искусства в науку. Здесь же стоит отметить появление в этот период таких областей прикладной математики, как системный анализ, нелинейное математическое программирование, исследование операций и ряд других [3-5]. В рамках данной статьи, посвященной процессу создания сложной техники, *под проектированием будем понимать деятельность, направленную на выбор такой структуры и таких параметров создаваемого изделия (или продукта, как сей-*

час принято говорить в современном деловом и техническом языках), которые обеспечивают экстремум какой-либо характеристике или свертке характеристик этого изделия и удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к нему, которые записывается, как правило, в виде неравенств. В нелинейном программировании оптимизируемую характеристику принято называть *целевой функцией* или *критерием оптимальности*. Заметим, что целевые функции могут быть самыми разнообразными. Например, при дефиците времени, целевой функцией может быть время отыскания любого решения, удовлетворяющего ограничениям. Важно понимать, что главное в проектировании – это принятие решений. Решения могут приниматься осознанно или неосознанно, но в принятии решений всегда присутствуют те или иные предпочтения.

Структуры и величины, которые выбираются в процессе оптимизации, называются проектными переменными. Например, при проектировании самолета целевой функцией может быть расход топлива на перевозку одного пассажира на один километр, проектными переменными – геометрические параметры внешнего облика и множество других параметров, описывающих конструкцию. В качестве ограничений – достаточно малые скорости взлета и посадки для обеспечения безопасности, необходимая прочность конструкции и т.д.

Под «*структурой*» при оптимизации объектов техники обычно понимается те свойства объекта, описания которых содержат типы отдельных элементов, их количество и способы взаимодействия между собой. Например, стержни, работающие только на растяжение и сжатие, могут образовывать фермы различной конфигурации. **Структурная оптимизация** очень трудно поддается формализации, т.к. трудно предложить такое пространство проектных переменных, разным численным значениям которых соответствовали бы различные структуры.

В последнее время для описания и решения проектных задач, в которых выбираются не только структуры, но и такие параметры конструкции, как координаты узлов соединения, форма отдельных монолитных элементов и т.п., начинает использоваться термин «**топологическая оптимизация**» с соответствующими новыми методами. Заметим, что такое определение не вполне совпадает с определением топологии в математике.

Для решения параметрических задач разработано множество различных численных методов и программных продуктов. В этих задачах для определенной структуры ищутся оптимальные значения параметров отдельных элементов, которые принимаются за проектные переменные. Например, для строительной конструкции – фермы – в этой роли могут выступать площади поперечных сечений стержней и координаты узлов. Решение таких задач уже входит в повседневную проектную практику.

Постановка и решение оптимизационных задач, на наш взгляд, является сущностью процесса проектирования. На рисунке 1 показана блок-схема решения проектных задач с использованием рекомендаций системного анализа и основных положений нелинейного математического программирования.

В блоке 1 ищется ответ на два основных вопроса [3]: «С чем имеем дело?» и «Чего хочет заказчик или мы сами в связи с данной задачей?». Под **математической моделью** объекта проектирования в блоке 6 следует понимать *совокупность расчетных методов, алгоритмов и программ, а также экспериментальных данных и другой дополнительной информации, которые позволяют вычислить значение целевой функции в любой точке пространства проектных переменных и ответить на вопрос: «Принадлежит ли эта точка к области допустимых проектов?»* То есть, позволяют оценить – выполняются ли в этой точке все ограничения на проект. В блоках 8 и 9 специалисты принимают трудно формализуемые решения по проекту на основе результатов оптимизации. В блоке 10 принятые решения доводятся до твердотельных моделей и всех необходимых описаний. Здесь же необходимо сделать одно

очень важное замечание. Математическая модель, разрабатываемая в блоке 6, должна быть *работоспособной* и *достоверной* во всем диапазоне изменений проектных переменных. В противном случае, должны быть наложены ограничения на пределы изменения проектных переменных, внутри которых математическая модель может давать достоверный результат.



Рисунок 1 – Блок-схема решения проектных задач

Поясним сказанное примером из истории становления метода конечных элементов (МКЭ). В ОКБ им. А.Н. Туполева талантливым инженером Глезером В.Л. был разработан «Комплекс программ расчета крыльев» – весьма эффективный для вычислительной техники своего времени. Среди упрощений, которые использовались в программе для моделирования крыльев, было предположение о малости углов наклона панелей обшивки к срединной поверхности крыльев и, соответственно, косинус этого угла принимался равным единице, а синус – величине угла в радианах. Комплекс программ был настолько удобен для конструкторов, что его стали применять и не по назначению. Например, для расчета фюзеляжей в зоне вырезов, что конечно, порождало серьезные ошибки, хотя картины деформаций и напряжений имели «правдоподобный» вид.

Проектирование любой технической системы сопровождается множеством расчетов, которые выполняют инженеры. Эти расчеты целесообразно разделить на две группы. К первой группе, которую можно назвать «*анализом*», относятся задачи, в которых все решения относительно создаваемого объекта приняты и нужно определить все свойства этого объекта: значение целевой функции и значения характеристик, на которые накладываются ограничения. Например, значения напряжений в конструкции для того, чтобы вынести суждение о том, разрушится она под воздействием внешней среды или нет и т.п. Эти знания нужны для

того, чтобы проверить выполнение ограничений, которые накладываются на функционирование объекта проектирования, и вынести суждение – находится ли точка в пространстве проектных переменных в области допустимых проектов и каково значение целевой функции. С методологической точки зрения особенность задачи анализа состоит в том, что если отсутствуют надежные методы проверки ограничений, то объект с выбранными параметрами может быть построен и испытан физически. В реальной практике такие задачи решаются с помощью математического моделирования и сопровождаются натурными экспериментами для проверки как результата проектирования, так и достоверности тех моделей, которые используются для описания объекта проектирования.

Задачи второго типа, которые связаны с выбором оптимальных структуры и параметров создаваемого объекта, принято называть «*синтезом*». Особенность этих задач состоит в том, что во многих случаях структурная оптимизация пока остается в большей мере прерогативой творческих способностей человеческого ума. Кроме того, оптимальность предлагаемых решений не может быть проверена физическим экспериментом, т.к. физическим экспериментом можно проверить только правильность вычислений целевой функции и свойств объекта, связанные с выполнением ограничений.

В последнее время во многих сферах инженерной деятельности стали использоваться словосочетания типа: «Виртуальный самолет», «Виртуальный двигатель» и т.д. без какого-либо соглашения о том, что следует понимать под этими терминами. То ли компьютерные геометрические модели, то ли нечто большее. Термин еще не устоялся. На наш взгляд в проектировании его можно определить следующим образом. *Виртуальное изделие – это система математических моделей, которая позволяет провести оптимизацию параметров, спроектировать, построить изделие и дать ответы на все вопросы о его поведении в условиях функционирования.*

Данная статья написана на основе опыта автора по участию в проектировании самолетов, экспертизе научных работ и преподавании проектно-конструкторских дисциплин. Онтологический анализ предметной области позволяет с уверенностью говорить о том, что наведение порядка в базовых терминах способствует формализации и математизации процесса проектирования, однозначному пониманию задач и успешному их решению.

## 2 Смена проектных парадигм

Проектирование сложных технических устройств неизбежно ведется итерационно, с уточнением ряда взаимосвязанных параметров. Проектная практика в отдельных видах машиностроения выработала определенные алгоритмы раскрытия неопределенностей, связанных с выбором проектных переменных. Укрупнено эти алгоритмы имеют следующую схему. На начальных стадиях проектирования для выбора приемлемых значений проектных переменных используются упрощенные математические модели проектируемого изделия, которые позволяют вычислить предельные значения того или иного параметра (проектной переменной) через выполнение ограничения в виде равенства. Так, например, выбирается удельная нагрузка на крыло самолета по условиям обеспечения взлетно-посадочных характеристик [6]. Чем меньше эта величина, тем меньше взлетно-посадочные скорости, т.е. тем безопаснее самолет. Однако инженер знает из других дисциплин, что чем больше удельная нагрузка на крыло, тем легче будет его конструкция (как ни парадоксально это звучит на первый взгляд!). Поэтому проектант выбирает наибольшую величину удельной нагрузки на крыло, при которой еще выполняются все требования по безопасному взлету и посадке. Подобным образом выбирается множество проектных переменных с постепенным уточнением, и все эти расчеты называются «проектировочными».

В сложившейся системе проектирования, во всяком случае, в самолетостроении, на заключительном этапе разработки, когда определен внешний вид самолета, его конструкция, структура и параметры всех отдельных элементов, выполняются так называемые «*поверочные*» расчеты с использованием всех достижений в математическом моделировании в различных дисциплинах: аэродинамике, строительной механике, динамике полета и т.д. Как правило, эти расчеты идут параллельно с натурными испытаниями, при этом выявляются нарушения отдельных ограничений, и в конструкцию вносятся изменения. Этот процесс, называемый «*доводками*» довольно часто многократно повторяется. В итоге целевая функция, т.е. качество проекта в целом, практически всегда «ухудшается». Расходы времени и материальных ресурсов на этот этап разработки довольно часто становятся большей частью стоимости и времени разработки проекта от замысла до запуска изделия в производство.

Такой порядок проектирования в авиастроении сложился постепенно. Сначала был метод «проб и ошибок». (Читатель наверняка получит удовольствие, если найдет книгу Карла Вуда [7] и ознакомится хотя бы с предисловием к ней, написанным в форме памфлета). В результате выполнения большого числа проектов накопился большой объем статистических данных. Их обработка позволила получить достаточно простые расчетные соотношения для выбора проектных переменных летательных аппаратов, подобных предшествующим. Этот метод проектирования можно назвать «*эволюционным*». Он зародился примерно в 30-е годы XX века и пришел к своему исчерпанию в 90-е. К этому времени резко увеличилась сложность новых проектов, с одной стороны, а с другой стороны – естественно уменьшилось их количество. Кроме того, оказались исчерпанными возможности некоторых технических решений, используемых материалов и т.д. Например, в самолетостроении исчерпаны возможности традиционной аэродинамической схемы для дальнейшего увеличения грузоподъемности летательных аппаратов из-за проявления действия так называемого закона «*квадратов и кубов*» [8]. Дальнейшее повышение прочности алюминиевых сплавов связано с ухудшением их способности сопротивляться развитию усталостных трещин. Поэтому для дальнейшего прогресса требуется поиск новых схемных решений и переход на принципиально новые материалы. Такими видятся сейчас композиционные материалы. В этих условиях традиционная схема проектирования, которую будем называть «*эволюционной*», также может считаться исчерпанной. На рисунке 2 показана схема разработки конструкции самолета по эволюционной технологии [9].

Главные недостатки этого порядка проектирования:

- На ранних стадиях проектирования концептуальные решения об облике самолёта, о размещении вырезов и стыков, о выборе силовой схемы планера решаются, как правило, интуитивно, на основе прототипов, в лучшем случае с анализом нескольких вариантов решений. Отыскание оптимального решения не гарантируется, и отклонение от оптимума может быть большим.
- На стадии рабочего (детального) проектирования отдельных агрегатов самолёта назначение размеров силовых элементов конструкции производится по так называемым проектировочным расчётам. Обычно они сильно упрощены и недостаточно точны. В итоге поверочные расчёты и натурные испытания выявляют много ошибок и неточностей, устранение которых приводит к большому, трудно прогнозируемому увеличению общего календарного времени разработки самолёта и стоимости проекта в целом.

Следствием этого является принятие ошибочных проектных решений и длительный цикл испытания и доводок.

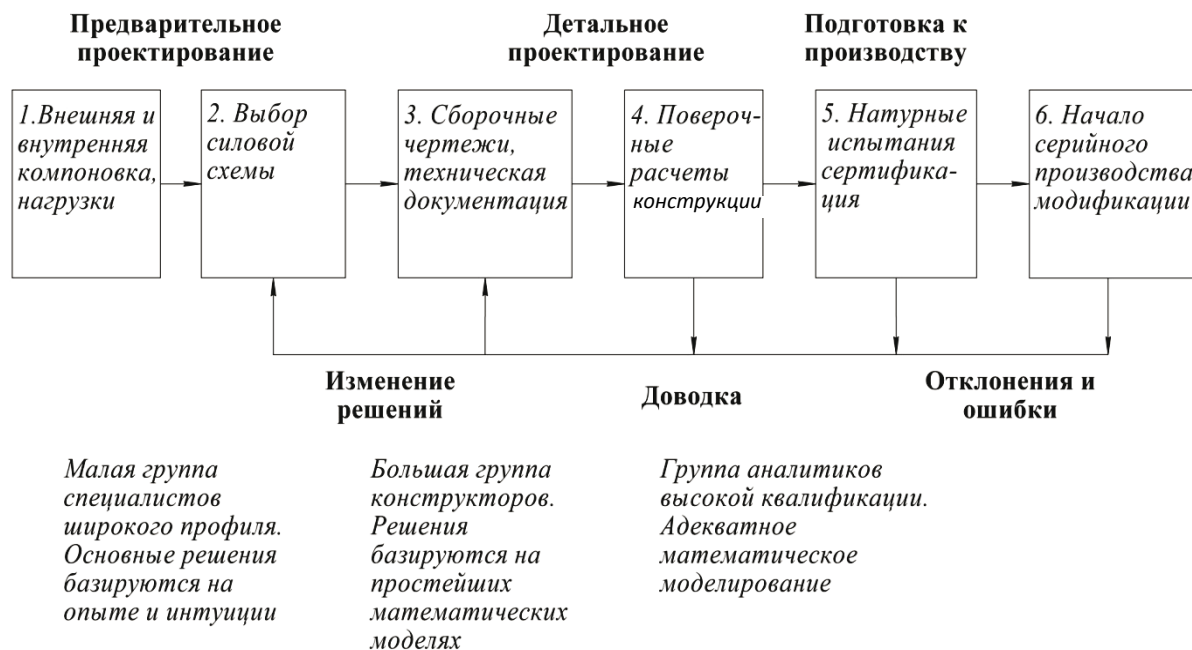


Рисунок 2 - Схема традиционного (эволюционного) порядка проектирования авиационных конструкций

На рисунке 3 показаны характерные для этой технологии общие затраты на проект в отношении к плановым и полнота принимаемых решений по времени разработки летательного аппарата. Цифровые оценки собраны из различных источников, включая экспертные. Аналогичные графики можно найти в [10].

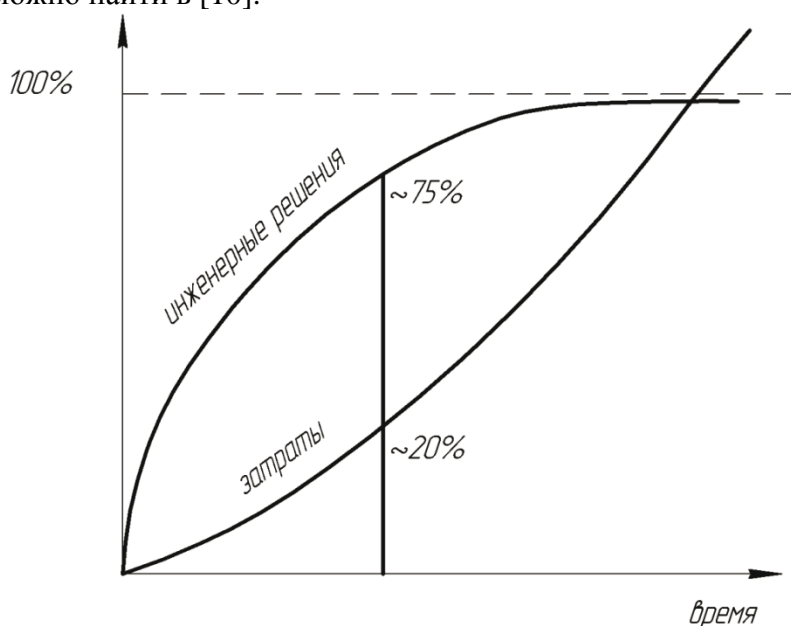


Рисунок 3 - Изменение затрат и распределение принятых решений (в %) на различных этапах разработки ЛА

В ряде источников [11] можно найти оценки стоимости исправления ошибок, которые растут на порядок с каждым этапом жизненного цикла разработки продукции. Если исправление ошибки при выборе облика самолета стоит одну единицу, то исправление ее в эскизном проекте будет стоить 10 единиц, в рабочем проектировании – 100 и т.д.

В настоящее время развитие многих инженерно-технических наук и собственно науки о проектировании приводит к новой проектной парадигме, которая в англоязычной технической литературе получила название «*concurrent design*», что можно перевести на русский язык как «*проектная технология точного попадания*» [9, 12].

Это термин родился в дискуссиях автора с профессором университета Purdue (США) Терри Вейсхааром. Слово *concur* имеет значение *сходиться, пересекаться в одной точке*. Слово *concurrent* – *пересекающийся, совпадающий* [13]. В США, по толкованию Терри Вейсхаара, эти слова еще имеют смысл, связанный с оружием и его прицелом и обозначают: *поймать объект в перекрестье и попасть точно в цель*. Эта новая проектная парадигма рождена требованиями времени и её в различных формулировках можно найти в [11].

Новая технология проектирования была разработана вскоре после появления метода конечных элементов как достаточно универсального и высокоточного инструмента для анализа напряженно-деформированного состояния произвольных авиационных конструкций [14]. Отличительные особенности этой технологии состоят в использовании высокоточного математического моделирования и топологической (структурной) оптимизации на ранних стадиях проектирования.

На рисунке 4 технология точного попадания показана применительно к конструкции летательных аппаратов.



Рисунок 4 - Схема проектирования по технологии «точное попадание»

Главные особенности этого порядка проектирования и его отличия от традиционного состоят в том, что на этапе выбора силовых схем конструкторы и аналитики работают вместе и применяют научно обоснованные методы структурной оптимизации. Для этих целей используются конечно-элементные модели первого уровня (КЭМ-I), которые служат для генерирования силовых схем из некоторого континуума – непрерывной упругой среды. Затем строятся конечно-элементные модели будущей конструкции КЭМ-II. При этом конечные элементы используются как язык для описания принятых структурных решений. Далее на конечно-элементной модели проводится параметрическая оптимизация и только после этого ведется рабочее проектирование и выпускаются чертежи отдельных узлов и деталей конструкции с учетом их рекомендуемых размеров и действующих в них усилий из общего расчёта планера самолёта как единой упругой системы.

Важно заметить, что в традиционном подходе при выполнении поверочного расчёта адекватность математической модели и конструкции обеспечивает аналитик, и иногда это очень трудная задача. В новом подходе эту адекватность обеспечивает в большой мере конструктор.

Новый подход использует математическое моделирование высокого уровня, начиная с ранних стадий проектирования. Определенный опыт, накопленный в этой области, позволяет говорить о существенном сокращении доводочных работ и изменении роли испытаний. Вместо основного средства для выявления ошибок проектирования испытания должны использоваться для подтверждения правильности проектирования. В этом и заключается главный смысл новой проектной парадигмы – попасть точно в цель!

Для успешной реализации новой проектной технологии необходимо обеспечить, в первую очередь, точность расчетов, которые позволяют разработчику выбрать оптимальную структуру и параметры создаваемого объекта. Эти расчеты и соответствующие модели можно назвать «прогнозными» или даже, более точно, «предсказательными».

### 3 Повышение точности проектных расчетов

#### 3.1 Адекватное математическое моделирование

Современные вычислительные средства дают практически безграничные возможности для использования достаточно мелких сеток в численных методах решения задач механики деформируемого твердого тела и аэрогидродинамики, которые характерны для различных отраслей машиностроения. На сегодняшний день в проектной практике используются сетки с числом конечных элементов более  $10^6$  в расчетах конструкций и более  $10^7$  конечных элементов в задачах аэродинамики. Причем с такими параметрами решаются не только статические задачи, но и динамические, включая ударное разрушение [15, 16]. При такой свободе в выборе размерности решаемых задач у проектанта и поддерживающего его аналитика появляется возможность отказаться от ряда упрощающих гипотез в моделировании конструкций, которые для определенных геометрических параметров объекта проектирования могут давать очень высокую точность, но для других давать ошибочные результаты. Например, в расчетах тонкостенных авиационных конструкций используются в основном три типа элементов: мембранный, чисто сдвиговой и пластина с изгибной жесткостью. Каждый из них дает достаточно верные результаты для определенных соотношений размеров элемента в плане и его толщины. Если решается только задача анализа определенной конструкции, то расчетчик выбирает при ее моделировании наиболее подходящий тип элемента. Но если решается задача оптимизации, то эти геометрические соотношения в различных частях проектируемой конструкции заранее не известны. Поэтому в таких задачах целесообразно отдавать предпочтение более универсальным элементам и использовать нелинейный подход. В расчетах конструкций такими конечными элементами являются трехмерные тела (solid). При использовании достаточно мелких сеток из них можно «набрать» практически любую конструкцию. Наши собственные исследования адекватности таких элементов с использованием специальных тестов дали по каждому из них положительные результаты. Конечно, при использовании трехмерных сеток возникают определенные трудности по интерпретации результатов, но они представляются вполне преодолимыми.

Проектирование по описанной технологии с использованием высокоточного математического моделирования целесообразно использовать на всех этапах разработки изделия от выбора его концепции и внешнего облика до проектирования деталей. На рисунке 5 показаны аэродинамическая и прочностная модели самолета перспективной конфигурации для оп-



тимизации геометрических параметров крыла. На рисунке 6 показаны соответственно результаты расчета поверхностных нагрузок и величин эквивалентных напряжений в конструкции крыла.

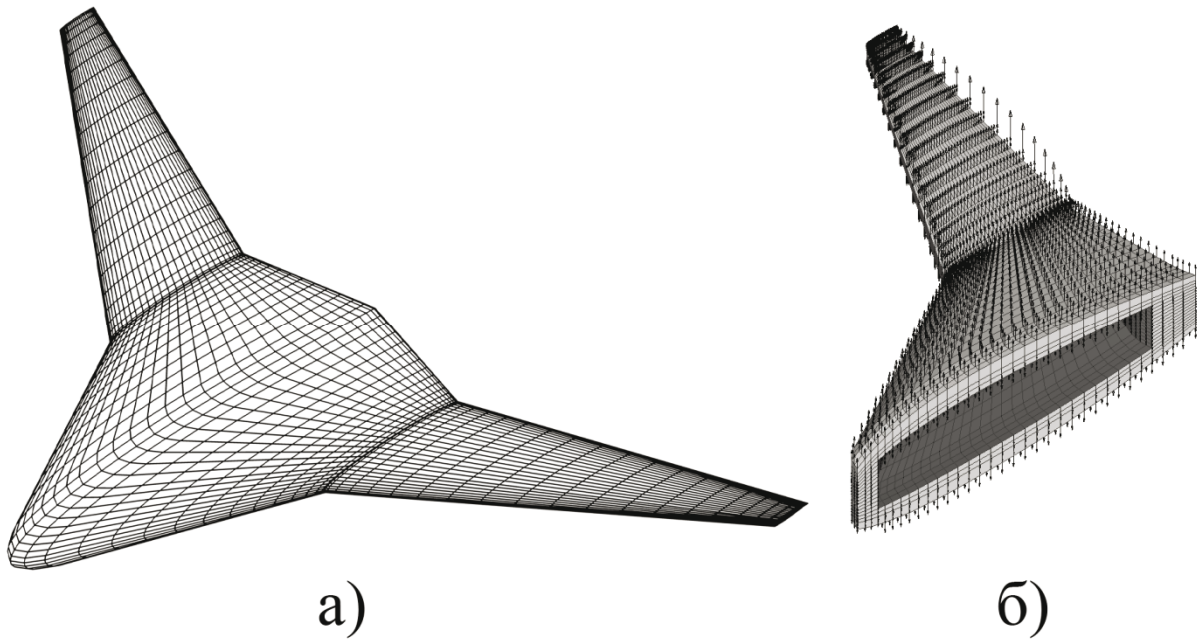


Рисунок 5 – Аэродинамическая (а) и прочностная (б) модели самолета

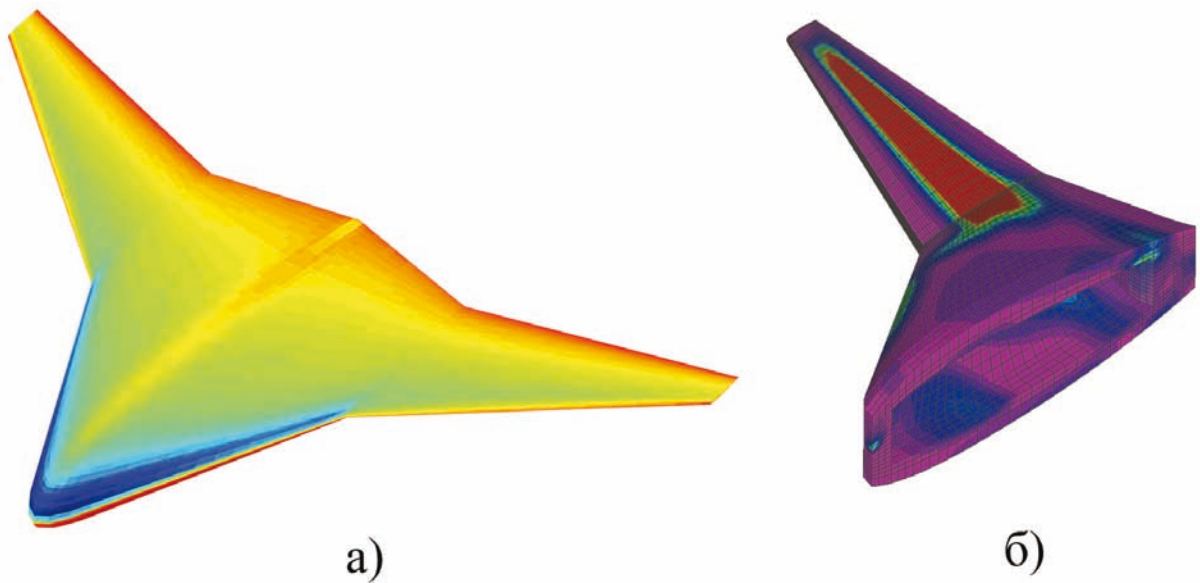


Рисунок 6 – Результаты расчета поверхностных нагрузок (а) и величин эквивалентных напряжений (б) в конструкции крыла

На рисунке 7 показана процедура топологической оптимизации сложной детали – «качалки» – для системы управления самолетом.

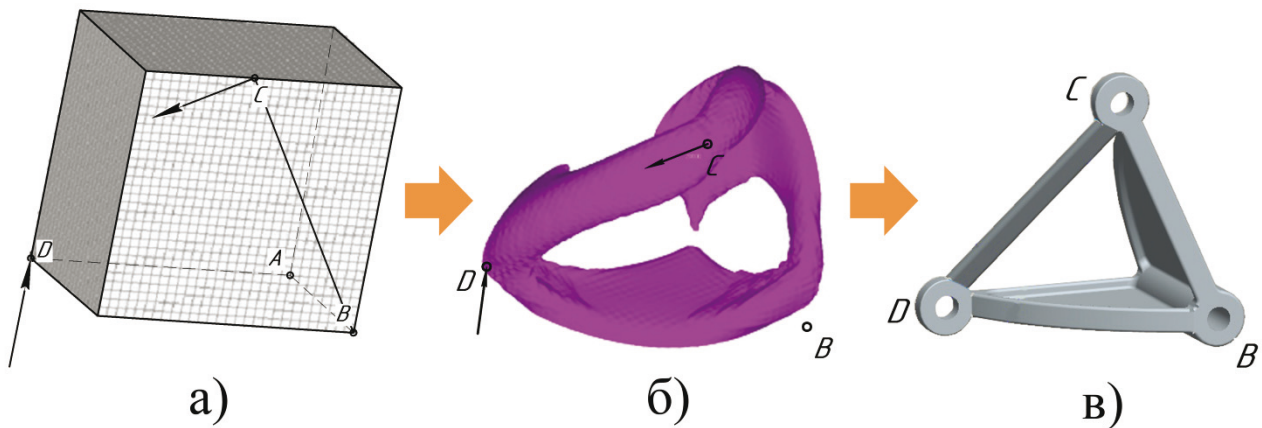


Рисунок 7 – Топологическая оптимизация «качалки»: а) – постановка задачи; б) – распределение материала; в) – принятое решение

Сложность этой проектной задачи состоит в том, что известными являются только ось вращения детали А-В и точки приложения сосредоточенных сил С и D, лежащих в параллельных плоскостях. Поэтому, деталь неизбежно должна быть трехмерной. На рисунке 7а показана постановка задачи и разбиение на конечные элементы тела переменной плотности, которое потенциально включает в себя все возможные конфигурации проектируемой детали. На рисунке 7б показано распределение плотностей материала после оптимизации по специальному алгоритму. Принятое решение по конструкции детали показано на рисунке 7в.

### 3.2 Моделирование и сертификация

Одним из актуальных направлений применения высокоточного моделирования в проектировании сейчас стала замена дорогостоящих натуральных испытаний моделированием. Например, очень трудно, дорого и небезопасно провести испытания самолета на грубую посадку, то есть посадку с большой вертикальной скоростью в момент касания с землей. Использование совокупности упругой, аэродинамической и инерционной моделей конструкции самолета и шасси позволяют делать это вполне адекватно.

Очень сложный и интересный класс задач связан с экстремальными воздействиями внешней среды на объект проектирования. В авиации таким является, увы, столкновение с птицей. Птица может попасть куда угодно. Наиболее опасные места – остекление кабины пилотов и воздухозаборники двигателей. Для таких испытаний разработаны специальные методики выстреливания в самолет тушкой замороженной птицы с определенной массой и скоростью. Однако проведение большого числа таких испытаний достаточно дорого. В [17] предложен эффективный подход к решению этой проблемы, суть которого сводится к следующему. Проводится ограниченное число натуральных испытаний, и выполняется математическое моделирование этих ситуаций. Из сравнения результатов определяются критерии разрушения, и далее проводятся все необходимые расчеты, т.е. просматривается множество опасных ударных случаев нагружения конструкции. Таким образом, высокоточное моделирование используется как эффективный инструмент при проведении сертификации продукции.

### 3.3 Многодисциплинарность и оптимизация

Один из эффективных приемов преодоления многих неопределенностей в проектировании сложной техники по эволюционной технологии состоит в использовании декомпозиции задач и решении их в определенной последовательности. Так, в проектировании самолетов сначала традиционно делается выбор внешних форм с учетом требований аэродинамики в предположении абсолютной жесткости летательного аппарата. Затем выбирается конструкция с учетом требований прочности и т.д. Однако по мере совершенствования методов проектирования и, особенно, с применением математических методов оптимизации, результаты, найденные в рамках различных научных дисциплин, перестают соответствовать друг другу. Или даже входят в противоречие. Простой пример. Тщательное проектирование крыла приводит к конструкции, близкой к равнопрочной. Высокий уровень напряжений порождает большие деформации, которые могут изменить распределение аэродинамических нагрузок. На рисунке 8 показано распределение подъемной силы по размаху стреловидного крыла в предположении его абсолютной жесткости (сплошная линия) и с учетом деформаций (пунктир).

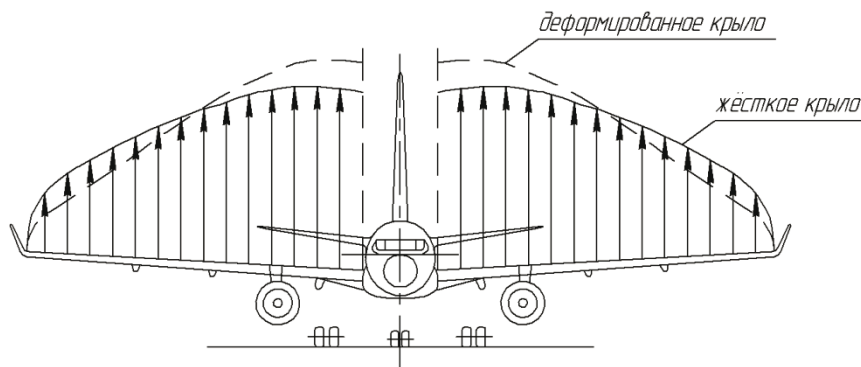


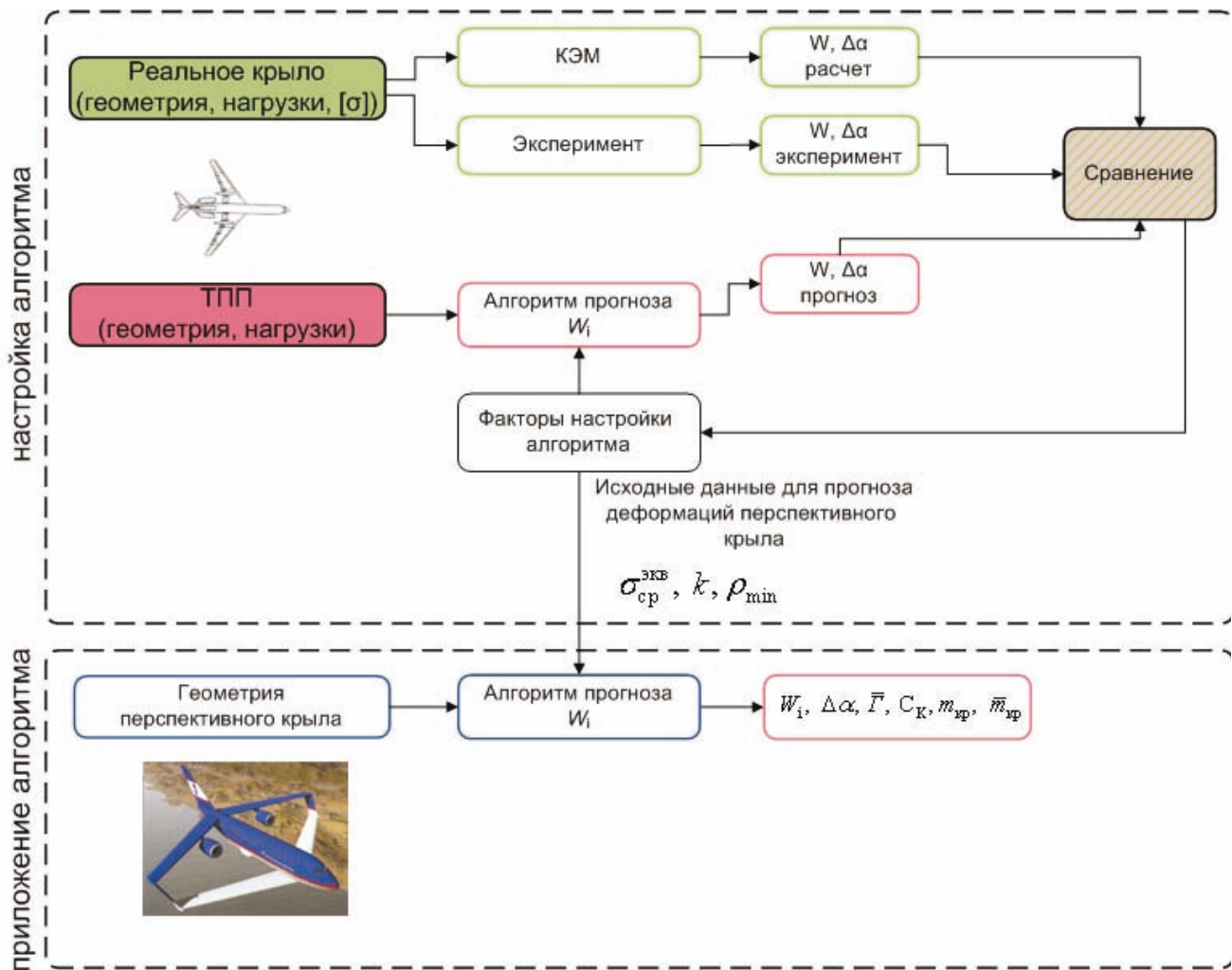
Рисунок 8 – Распределение подъемной силы по размаху крыла

Разница изгибающих моментов в корневой части крыла составляет величину более 10%. Неучет этого обстоятельства в проектировании представляется недопустимым. Поэтому внимание многих специалистов в последнее время обращено на решение задач многодисциплинарной оптимизации (МДО) [18]. Некоторые оригинальные подходы к решению подобных задач с использованием тела переменной плотности в качестве новой оптимизационной модели можно найти в публикациях по учету деформаций крыла на ранних стадиях проектирования [19] и по комплексному учету весовой и аэродинамической эффективности самолетов [20].

### 3.4 Использование прототипов

Какими бы ни были совершенными математические модели, используемые в проектировании, на окончательный результат – параметры завершеного проекта – оказывает влияние множество трудно формализуемых факторов. Анализ уровня максимальных напряжений в конструкции некоторых спроектированных и построенных крыльев показал, что средняя величина этих напряжений в них примерно на 30% меньше той, на которую проектировались силовые элементы по условиям обеспечения заданного ресурса и работы без потери устойчивости [21]. Объясняется это отступление рядом технологических требований, а также назначением толщин обшивок в концевой части крыла по требованиям аэроупругости. Знание реально достижимой величины средних напряжений в крыле существенно для правильного

прогнозирования деформаций при проектировании нового самолета. Для учета таких факторов может быть использована методика, укрупнено показанная на рисунке 9.



$W, \alpha, \Gamma, C_K, m_{xp}, \sigma, \rho, k$  - прогибы крыла, углы атаки, циркуляция скорости, коэффициент силового фактора, масса крыла, напряжение, плотность материала и коэффициент, учитывающий геометрические особенности оптимизационной модели, соответственно; ТПП – тело переменной плотности.

Рисунок 9 - Методика определения значимых факторов для обеспечения точности прогнозных расчетов перспективных самолетов

Суть ее состоит в том, что по предлагаемой методике многодисциплинарной оптимизации сначала производится проектирование уже существующего самолета (прототипа) в целом или его частей на условия, которые задавались на соответствующем этапе проектирования. То есть организуется как бы сдвиг во времени назад. Далее результаты сравниваются. Естественно, что они различаются, так как реальная конструкция неизбежно «впитала» в себя в процессе испытаний и доводок все трудно формализуемые и трудно учитываемые факторы. Далее выясняются причины расхождений и ищутся пути корректировки методики МДО. В этой роли могут использоваться настроечные коэффициенты и константы. При таком подходе методика МДО может применяться для проектирования самолета с большими компоновочными отличиями от прототипа. Верхний мегаблок на рисунке 9 может рассматриваться как настройка предсказательной модели.

### 3.5 Расчетно-экспериментальные методы

Во многих отраслях техники сейчас происходит переход на новые композиционные материалы (КМ). Особенности их использования состоят в том, что наряду с конструкцией проектируется и создается сам материал, выбирается число и ориентация однонаправленных слоев и т.д. Кроме того эти материалы пока не отличаются стабильностью свойств, и они сильно зависят от технологии производства. Например, в наших собственных экспериментальных исследованиях образцы однонаправленного композита из углепластика показали устойчивые значения модуля упругости, но разброс по прочности - коэффициент вариации – составил 14%, рисунок 10.

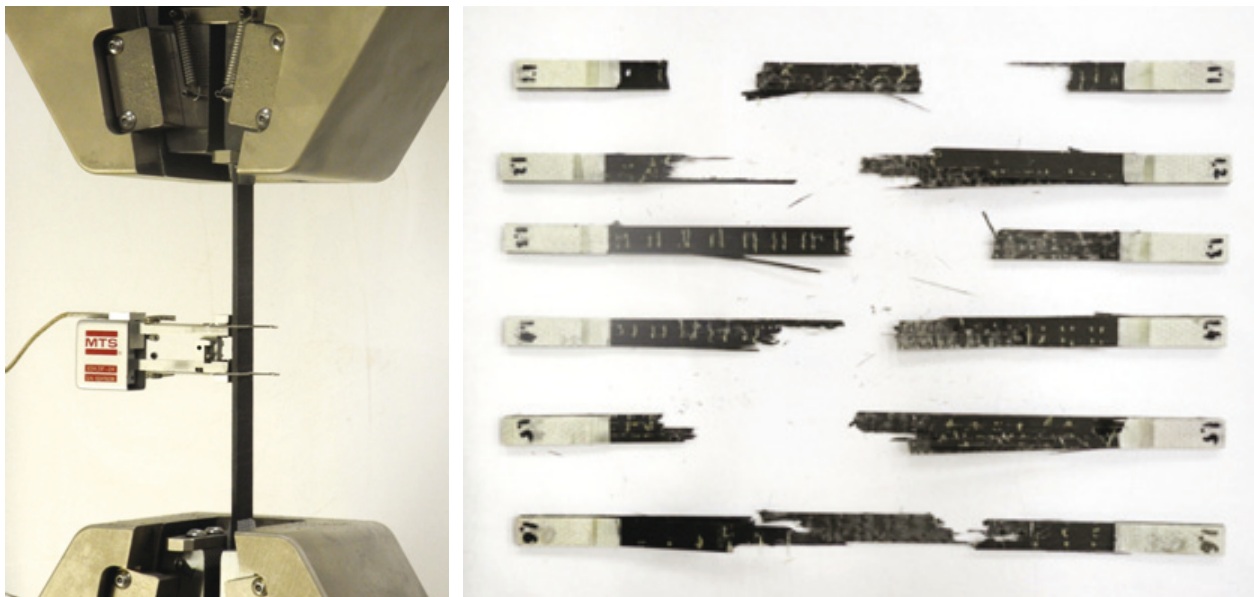


Рисунок 10 – Результаты испытаний образцов из композиционного материала

Поэтому в обозримом будущем проектирование конструкций из КМ должно обязательно сопровождаться натурными испытаниями образцов-свидетелей.

### 3.6 Пределы достижимого

Несмотря на приоритет МДО для поддержки реального проектирования, определенное значение имеют и монодисциплинарные исследования с различными, отдельно взятыми критериями оптимальности. Ценность таких исследований состоит в том, что они дают оценки предельно достижимых результатов в идеальных условиях, и сравнение их с результатами МДО может дать полезную информацию для поиска других подходов к решению поставленной задачи, изменению граничных условий, принятой топологической схемы и т.п. Примером может служить задача об оценке минимальной массы конструкции для передачи определенной нагрузки, занимавшая многих ученых на протяжении всей истории строительной механики и нашедшая применение в разработке теории весового анализа конструкций [8]. Подобным образом знание предельных значений достижимого аэродинамического качества для различных конфигураций крыла может быть решающим при выборе аэродинамической схемы ЛА. Знание пределов совершенства отдельных компонентов сложного технического устройства имеет в проектировании летательных аппаратов особое значение, так как каждый из них вносит свой «вклад» в его самую главную техническую характеристику – взлетную мас-

су. Кавычки здесь использованы по той причине, что чем меньше «вклад», тем лучше проект!

На ранних стадиях проектирования ЛА с принципиально новыми схемными решениями определить его взлетную массу очень сложно. Для этих целей используется так называемое «уравнение существования», предложенное В.Ф. Болховитиновым [22]. В него входит абсолютное значение полезной нагрузки, а остальные компоненты входят обычно в виде относительных долей от полной массы. Знание пределов достижимого позволяет оценивать доли. В этом направлении заслуживает внимание публикация [23], которая отражает результаты специального исследования изменения этих долей с учетом технического прогресса и пределов достижимого.

#### 4 Достоверность и контроль

Реализация проектной технологии точного попадания, как хороший производственный процесс, должна быть комплексной и обеспечивать получение достоверных результатов на всех этапах жизненного цикла разработки изделия. Поскольку в этой технологии ключевая роль отводится математическому моделированию, то все исходные данные и модели должны подвергаться контролю с помощью известных и специально разрабатываемых тестов. Это касается, прежде всего, моделей функционирования. Например, программа расчета для аэродинамических характеристик крыла, предполагающая малые дозвуковые скорости и малые углы атаки, может быть «нечаянно» применена для околозвуковых скоростей и углов атаки больше критического. Если в программе нет автоматической блокировки, то результаты будут получены, но они будут ошибочными. Вообще, это очень серьезный вопрос, но он выходит далеко за рамки данной статьи.

Другой аспект проекта, который нуждается в контроле по мере его выполнения, это достижение запланированного результата, так как цель проектирования - не просто получение работоспособного изделия, а получение в некотором смысле оптимального результата. При разработке сложной техники неопределенности раскрываются постепенно, и в этом процессе возможен и целесообразен промежуточный контроль тех характеристик, которые существенно влияют на конечный результат, на целевую функцию. В самолетостроении такими контролируемыми характеристиками могут быть аэродинамическое сопротивление и масса отдельных частей. Их целесообразно задавать в виде определенных лимитов. В качестве примера можно назвать систему весовых лимитов и весового контроля в самолетостроении [24]. При разработке лимитов, а это фактически контрольные показатели качества проекта, удобно использовать научно обоснованные пределы достижимого, которые были обсуждены в разделе 3.6. И если по ходу проекта выявляется опасность выхода за лимит, то необходим поиск новых технических решений: другая схема, другой материал и т.д.

Для выполнения рассмотренных двух видов контроля целесообразно создание независимых подразделений. Так и делается на ряде проектных организаций.

#### Заключение

Проектную технологию точного попадания можно уверенно считать одним из главных направлений в модернизации инженерного труда. На пути ее разработки, внедрения и развития предстоит решить много задач, часть из которых рассмотрена в данной работе. Компактно их можно сформулировать следующим образом.

- Дальнейшее осмысление процесса проектирования. Наведение четкого терминологического порядка в этой сфере.

- Математическая формулировка проектных задач.
- Использование высокоточного математического моделирования, начиная с ранних стадий проектирования.
- Использование междисциплинарного подхода в постановке и решении оптимизационных задач.
- Разработка эффективных методов контроля и обеспечения достоверности результатов всех этапов проектирования изделия.

К этому еще следует добавить работу по соответствующей подготовке и переподготовке кадров.

### Благодарности

Автор благодарит профессоров Терри Вейсхаара (США) и Дитера Шмитта (Германия) за обсуждение ряда аспектов новой технологии проектирования, своих коллег по институту авиационных конструкций СГАУ, с которыми она разрабатывалась. Автор также считает своим долгом отметить большой вклад в практическое внедрение новой технологии безвременно ушедшего из жизни В.И. Абрамова, начальника отдела прочности ОКБ им. С.В. Ильюшина.

Работа выполнена с поддержкой ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, государственный контракт №14.740.11.0126 от 13.09.2010 г. по теме «Разработка инновационной технологии конструирования летательных аппаратов с использованием высокоточного математического моделирования и концепции CALS».

### Список источников

- [1] Хилл, П. Наука и искусство проектирования. Методы проектирования и научное обоснование решений [Текст]/П. Хилл. – М.: Мир, 1973. – 264 с.
- [2] Джонс, Дж. К., Инженерное и художественное конструирование. Современные методы проектного анализа [Текст]/ Дж. К. Джонс. - М.: Мир, 1976. - 326 с.
- [3] Холл, А. Д. Опыт методологии для системотехники [Текст]/А. Д. Холл. - М.: 1975. - 448 с.
- [4] Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст]/Д. Химмельблау. - М.: Мир, 1975. – 536 с.
- [5] Вентцель, Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст]/ Е.С. Вентцель. - М., 1972 г. - 552 с.
- [6] Егер, С.М. Проектирование самолетов [Текст]: учебник для вузов/С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев [и др.].– М.: Машиностроение, 2005. – 616 с.
- [7] Вуд, К. Проектирование самолетов [Текст]/К. Вуд.- М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. - 470 с.
- [8] Комаров, В.А. Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы [Текст] / В.А. Комаров //Общероссийский научно-технический журнал «Полет».- 2000.- №1. - С. 31-39.
- [9] Вейсхаар, Т.А. Человеческий фактор в проектировании авиационных конструкций [Текст] /Т.А. Вейсхаар, В.А. Комаров//Общероссийский научно-технический журнал «Полет».- 1998. - №1. - С. 17-23.
- [10] Афанасьев, П.П. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно пилотируемые летательные аппараты) [Текст] / П.П. Афанасьев, Ю.В. Веркин, И.С. Голубев [и др.]; Под ред. И.С. Голубева и Ю.И. Янкевича. - М.: Изд-во МАИ, 2006. - 528 с.
- [11] Братухин, А. Г. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение [Текст] / А.Г. Братухин.- М.:ОАО «НИЦ АСК», 2008.- 608 с.
- [12] Weisshaar, T. A. New World Vistas. Air and space power for the 21-st century. Aircraft and propulsion volume [Text]/ T. A. Weisshaar. - 1995. - P. 80-91.
- [13] Англо-русский политехнический словарь [Текст] / Под общ. ред. А. Е. Чернухина. - М. : Физматгиз, 1962. - 664 с.

- [14] Абрамов, В.И. Организационно технические аспекты применения МКЭ в проектировании самолетов [Текст]/В.И. Абрамов, Е.А. Иванова, В.А. Комаров, В.П. Пересыпкин// Методы исследования и разработок конструкций самолетов. - М.: МАИ, 1982. - С. 21-24.
- [15] Рябов, А.А. Анализ эффективности компьютерных технологий моделирования термонапряжённого состояния заднего стоечного узла ГТД/А.А. Рябов, В.Н. Речкин, С.А. Железов [и др.]// Электронный журнал «Труды МАИ». -2010.- №41. (<http://www.mai.ru/science/trudy/>).
- [16] Циберев, К.В. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения задач прочности [Текст]/К.В. Циберев, П.А. Авдеев, М.В. Артаманов, В.В. Борляев, Д.Ю. Дьянов [и др.]// Супервычисления и математическое моделирование. Труды XIII-го международного семинара / Под ред. Р.М.Шагалиева. - Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2012.
- [17] Китаев, М.В. Феноменологическая модель разрушения силикатных стекол для численного моделирования ударного нагружения [Текст] /М.В. Китаев// Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сборник научных трудов. - Самара. -2012. - С.124-137.
- [18] Proceedings der CEAS Conference on Multidisciplinary Aircraft Design and Optimisation.- Köln, 2001. – 272 p.
- [19] Лаптева, М.Ю. Повышение точности весовых расчётов крыльев [Текст]/ М.Ю. Лаптева// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2011. – Том 13, №1(2). – С. 322-325. ([http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011\\_1\\_322\\_325.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_1_322_325.pdf)).
- [20] Кузнецов, А.С. Выбор геометрических параметров самолёта интегральной схемы на основе высокоточного математического моделирования [Текст] / А.С. Кузнецов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т.13 (39). – №1 (2). – С.318-321. ([http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011\\_1\\_318\\_321.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_1_318_321.pdf)).
- [21] Комаров, В.А. Прогнозирование деформаций крыльев [Текст]/ В.А. Комаров, М.Ю. Лаптева// Общероссийский научно-технический журнал «Полет», 2011. – №3. – С. 8-12.
- [22] Болховитинов, В.Ф. Пути развития летательных аппаратов [Текст] /В.Ф. Болховитинов.- М.: Оборонгиз, 1962. - 130 с.
- [23] Gundlach, Jonh. F. Conceptual Design Studies of a Strut-Braced Wing Transonic Transport [Text]/ Jonh. F. Gundlach, Philippe-Andre Tetraault, Raphael E. Haftka [etc.]//Journal of Aircraft. - 2000. - P. 976-983.
- [24] Шейнин, В.М. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолетов [Текст]: Справочник/В.М. Шейнин, В.И. Козловский. - М.: Машиностроение, 1984 . - 552 с.

## Сведения об авторе



**Комаров Валерий Андреевич**, 1941 г. рождения. Окончил Куйбышевский авиационный институт в 1964 г., д.т.н. (1976 г.), профессор (1978 г.). Заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета. Действительный член академии инженерных наук России. Постоянный участник европейского семинара по авиационному образованию EWADE. Автор более 250 научных работ (в том числе 5 монографий). Научные интересы: механика, теория и практика проектирования авиационных конструкций.

**Valeriy A. Komarov** was born in 1941. He graduated from Kuibyshev Aviation Institute in 1964, received his Doctor of Technical Sciences Degree in 1976, Full Professor Degree in 1978. He is Head of Aircraft Design Department at Samara State Aerospace University, Member of Russian Academy of Engineering Sciences and regular participant of the European Workshop on Aircraft Design Education (EWADE). He is the author of over 250 scientific papers including 5 books. His research interest is mechanics, theory and practice of aircraft structural design.