

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ШПАНГОУТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2007

УДК 629.7.02 (075)  
ББК 68.59



**Инновационная образовательная программа  
"Развитие центра компетенции и подготовка  
специалистов мирового уровня в области аэро-  
космических и геоинформационных технологий"**

Составители: *Болдырев А. В., Комаров В. А.*

Рецензент д-р техн. наук, проф. К у р е н к о в В. И.

**Автоматизированное проектирование силовых шпангоутов:**  
метод. указания / сост.: *А.В. Болдырев, В.А. Комаров.* – Самара: Изд-во  
Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 40с.: 9 ил.

Рассмотрены цели, задачи и содержание курсового проекта по дисциплине "Применение САПР" для студентов специальности 220305 "Автоматизированное управление жизненным циклом продукции". Изложены этапы решения задачи об отыскании рациональной силовой схемы конструкции и даны рекомендации по их выполнению.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	4
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ .....	10
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	16
4. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА..	17
4.1. ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЗАДАНИЯ .....	17
НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ .....	17
4.2. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ .....	22
К ШПАНГОУТУ.....	22
4.3. РАЗРАБОТКА “ТРАДИЦИОННОГО” ВАРИАНТА СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА.....	25
4.4. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА.....	27
СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА НА ОСНОВЕ.....	27
ИНТУИТИВНЫХ СООБРАЖЕНИЙ .....	27
4.5. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА .....	27
В КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ.....	27
4.6. АНАЛИЗ СИЛОВОЙ РАБОТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИ.....	29
ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	29
4.7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМЫХ.....	30
ВАРИАНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ,.....	30
МАКСИМАЛЬНО ПРИБЛИЖЕННЫХ К ТЕОРЕТИЧЕСКИ.....	30
ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	30
4.8. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТАННЫХ ВАРИАНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА .....	31
5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .....	33
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	35
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	37

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Введение.** Большинство авиационных конструкций по своей природе являются тонкостенными и безмоментными. Лонжероны, шпангоуты и нервюры обычно состоят из поясов, адекватно моделируемых стержневыми элементами, и стенки, работающей в плоском (мембранном) напряженном состоянии. Обшивка часто подкрепляется стрингерным набором для увеличения критических усилий потери устойчивости. Тонкостенные конструкции отличаются высоким весовым совершенством при обеспечении необходимой прочности и жесткости в случаях действия распределенных нагрузок. Однако они плохо работают (в них возникают высокие изгибные напряжения) при действии сосредоточенных сил. Простое утолщение тонкостенных конструкций в таких местах приводит к чрезмерному их утяжелению. Поэтому практика выработала специальные приемы преобразования сосредоточенных сил в распределенные с помощью кронштейнов снаружи тонкостенной конструкции и силовых шпангоутов внутри нее [1,2]. Весовое совершенство этих элементов - распределителей сосредоточенных нагрузок, сильно зависит от выбора их силовой схемы [3].

Фюзеляжи современных самолетов обычно представляют собой полумонококовую конструкцию, состоящую из обшивки, стрингеров и шпангоутов. По назначению шпангоуты разделяются на *нормальные*, которые служат для придания формы фюзеляжу и подкрепления обшивки, и *усиленные (силовые)* – для восприятия поперечных сосредоточенных сил от крыла, оперения, шасси, двигателей и грузов и передачи их на обшивку. В зонах больших вырезов (люков, створок шассийных отсеков и т. п.) в фюзеляжах устанавливаются в виде окантовок усиленные шпангоуты и продольные силовые элементы – бимсы, балки, лонжероны (усиленные стрингеры).

Теорией и практикой проектирования авиационных конструкций выработан следующий принцип: для получения конструкции минимальной массы следует передавать усилия уравнивания различных частей и сил различной природы, например, воздушной нагрузки на крыло и массовых сил от грузов в фюзеляже, через конструктивные элементы, расположенные как можно ближе к внешним обводам самолета. То есть через обшивку и регулярный каркас.

Шпангоуты имеют высокую жесткость в своей плоскости и хорошо работают на поперечный изгиб в своей плоскости, опираясь на обшивку фюзеляжа. Наличие двух поясов и стенки в сечениях шпангоутов обеспечивает их работу на изгиб и сдвиг, а также повышает сопротивление усталости при акустических нагрузках. Для повышения живучести шпангоуты часто делают составными из нескольких частей [1].

Усиленные шпангоуты обычно отличаются от нормальных шпангоутов силовой схемой, мощностью поясов и толщиной стенок. В качестве примера рассмотрим хвостовую часть фюзеляжа Airbus A-380, представленную на рисунке 1.

На переднем плане расположены два нормальных шпангоута с постоянной строительной высотой. Далее в фюзеляже установлены усиленные шпангоуты крепления оперения. Десять усиленных шпангоутов, служащие для восприятия сил от киля, имеют увеличенную строительную высоту в верхней зоне. Переставной стабилизатор на самолете A-380 имеет центроплан. Для функционирования стабилизатора в боковых частях фюзеляжа предусмотрены большие вырезы. Крепление центроплана стабилизатора осуществляется с помощью двух усиленных шпангоутов. В зоне крепления переднего лонжерона стабилизатора усиленный *рамный шпангоут* имеет увеличенную строительную высоту в боковых частях и три дополнительных стержневых

элемента. В зоне крепления заднего лонжерона установлен *стеночный шпангоут* [1] с тремя отверстиями облегчения. В итоге силовые шпангоуты в совокупности с обшивкой, стрингерами и бимсами образуют сложнейшую пространственную конструкцию. От ее рациональности, а еще лучше – оптимальности – сильно зависит масса конструкции и, следовательно, эффективность всего самолета.



Рисунок 1. Хвостовая часть фюзеляжа А-380

**Задание на проект** представляет одну из типичных конструкторских задач, показанных на рисунке 2. Номера вариантов заданий обозначены арабскими цифрами. Значения силы  $P$ , радиуса оболочки  $R$  и параметра  $b$  выдает преподаватель каждому студенту индивидуально. Это задачи о передаче сосредоточенных сил и моментов на тонкостенные конструкции. Подобные задачи

возникают во многих областях техники. Например, в местах крепления к фюзеляжу самолета шасси, крыльев и оперения, в местах соединения корпусов ракетных ступеней, при размещении кораблей в сухих доках, в домкратных узлах кузова автомобиля и т.п.

**Цель работы** – развитие пространственного «силового» мышления и практическое освоение технологии автоматизированного проектирования силовых конструкций.

**Главная задача курсовой работы** - поиск наилучшей силовой схемы шпангоута для соответствующего случая нагружения. *Силовая схема* конструкции определяется количеством и типом силовых элементов, их расположением в пространстве и способами соединения между собой.

Для упрощения математического моделирования в процессе решения задачи, но без снижения общности используемых подходов, в работе рекомендуется рассматривать проектную ситуацию, показанную на рисунке 3, так как распределение уравнивающих усилий на границе между шпангоутом и оболочкой зависит от конструкции шпангоута и соотношения их жесткостей. В то же время из практики и вычислительных экспериментов известно, что эти особенности быстро угасают по длине оболочки и становятся малозначимыми приблизительно на расстоянии одного поперечного размера оболочки от возмущения (от силового шпангоута). Так как рассматривается только половинка цилиндрической оболочки, то граничные условия модели конструкции должны учитывать симметричность задачи относительно плоскости расположения шпангоута.

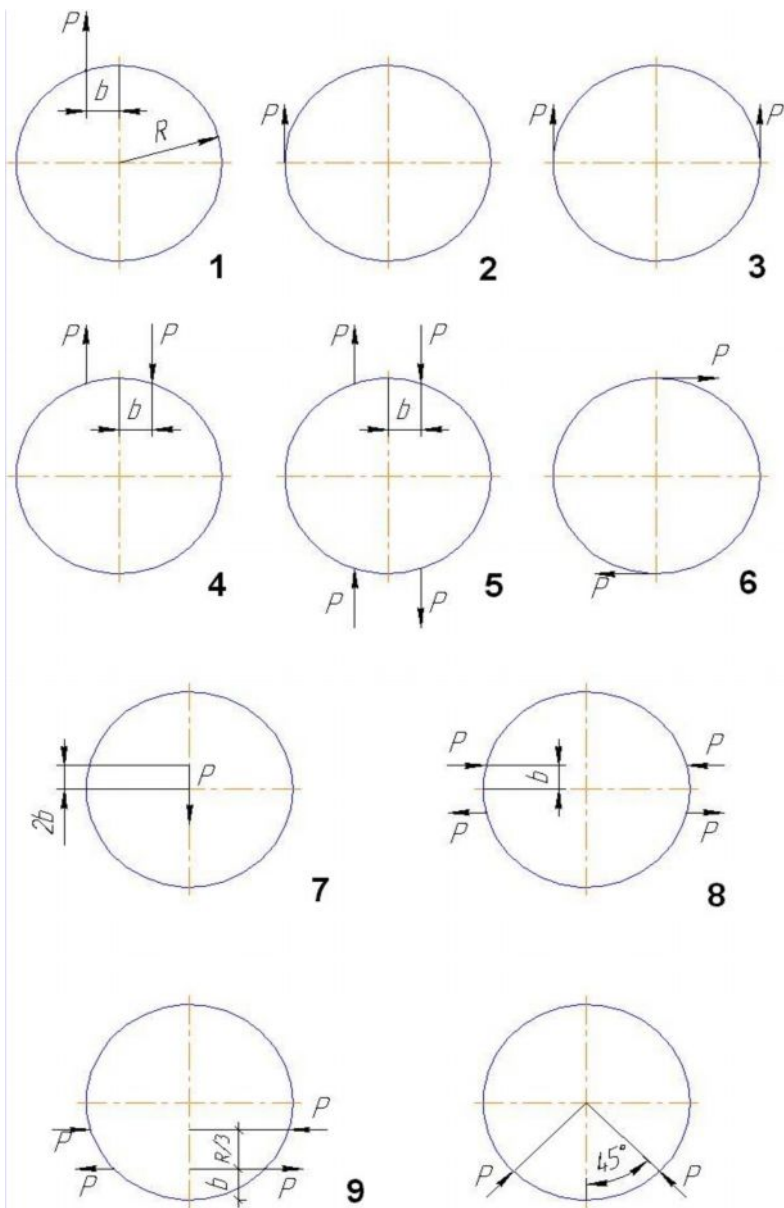


Рисунок 2. Варианты заданий



**Постановка проектной задачи:** имеется консольная круговая цилиндрическая каркасированная оболочка длиной  $L=D$ , нагруженная на свободном торце. Используется материал со следующими характеристиками:

модуль упругости 70000 МПа,

коэффициент Пуассона 0.3,

допускаемое напряжение 300 МПа,

плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>.

Требуется найти рациональную конструкцию силового шпангоута.

Задача решается по технологии [3] с использованием системы NASTRAN [4].

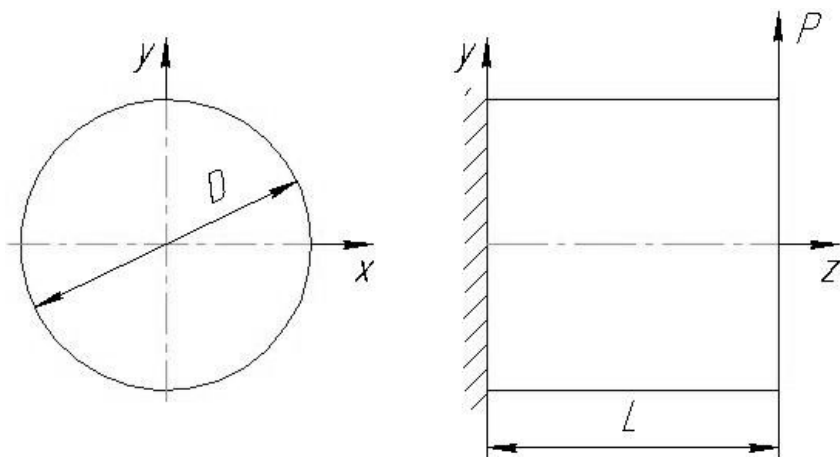


Рисунок 3. Проектная ситуация

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

Выбор силовой схемы относится к плохо формализуемым задачам структурной оптимизации. Поэтому решения, связанные с выбором силовых схем, на практике зачастую принимаются эвристическими методами, на основании экспертных оценок, опыта и интуиции, а также с использованием результатов расчетов на упрощенных математических моделях (балка, пластина). Более достоверное исследование свойств объекта проектирования с применением метода конечных элементов (МКЭ) при этом производится лишь в конце процесса его разработки на стадии проведения поверочных расчетов. В такой ситуации существует вероятность того, что некоторые решения, связанные с выбором силовой схемы конструкции, могут оказаться неудачными. Попытки устранения недостатков в структуре конструкции на завершающих стадиях проектирования обычно требуют значительных дополнительных затрат времени и средств. Поэтому для снижения технического риска, повышения качества и эффективности процесса проектирования в работе [3] предложена стратегия формирования силовой схемы с привлечением МКЭ еще до начала полномасштабной разработки конструкции на этапе рабочего проектирования.

Связь между результатами расчетов конструкции по МКЭ и ее потребной массой удобно строить через специфический критерий "силовой фактор"  $G$ , который отражает одновременно величину и протяженность действия внутренних усилий в конструкции.

Для фермы, состоящей из  $n$  элементов, силовой фактор определяется следующим образом:

$$G = \sum_{i=1}^n |N_i| \cdot l_i, \quad (1)$$

где  $i$  - номер стержня,

$N$  - усилие,

$l$  - длина.

Для мембранной конструкции:

$$G = \sum_{i=1}^n R_i \cdot S_i, \quad (2)$$

где  $i$  - номер элемента,

$R$  - эквивалентный поток усилий,

$S$  – площадь в плане элемента.

Для трехмерной произвольной конструкции:

$$G = \int_V \sigma^{\text{экв}} dV, \quad (3)$$

где  $\sigma^{\text{экв}}$  - эквивалентное напряжение,

$V$  - объем материала конструкции.

Свойства силового фактора подробно исследованы в работе [3]. Приведем ряд интересных свойств силового фактора, которые могут быть полезны для весовых оценок конструкций.

- $G$  определяется силовой схемой конструкции. Для статически определимых конструкций величина  $G$  не зависит от соотношения жесткостей силовых элементов, а для статически неопределимых зависит очень слабо. Например, площади поперечных сечений некоторых элементов и внутренние усилия в них могут меняться в процессе оптимизации конструкции в несколько раз, в то время как  $G$  конструкции в целом изменяется только на несколько процентов.
- Теоретически необходимый объем материала полнонапряженной конструкции с определенной силовой

схемой  $V_T$  может быть оценен через  $G$  и величину допускаемого напряжения с использованием расчета внутренних усилий для некоторого рационального распределения жесткостей элементов по простейшему соотношению

$$V_T = \frac{G}{[\sigma]}, \quad (4)$$

где  $[\sigma]$  - допускаемое напряжение материала.

Действительно, для полнонапряженной фермы мы имеем

$$V_T = \sum_{i=1}^n \frac{|N_i|}{[\sigma]} \cdot l_i = \sum_{i=1}^n F_i \cdot l_i, \quad (5)$$

где  $F_i$  - площадь поперечного сечения стержня.

Аналогичный результат можно получить для конструкций из мембранных элементов, если использовать в качестве меры внутренних усилий потоки эквивалентных усилий.

- Через  $V_T$ , плотность материала и коэффициент полной массы  $\varphi$ , который учитывает прирост массы за счет стыковочных и несилловых элементов в конструкции, за счет отклонений от оптимального распределения материала в пользу простоты и технологичности конструкций и т.п., можно вычислить реальную (практическую) массу конструкции:

$$m_h = \varphi G \frac{\rho}{[\sigma]} \quad (6)$$

или

$$m_h = \frac{\varphi G}{\bar{\sigma}}, \quad (7)$$

где  $\bar{\sigma}$  - удельная прочность материала.

В весовой формуле (7) каждый из трех сомножителей определяет почти независимые от других свойства конструкции:

$G$  - геометрия, силовая схема и нагрузки;

$\bar{\sigma}$  - прочность выбранного материала;

$\Phi$  - конструктивно-технологическое совершенство. Этот коэффициент может быть определен из ретроспективного анализа уже построенного самолета, который целесообразно взять в качестве прототипа [3].

План решения задачи отыскания рациональной силовой схемы конструкции выглядит следующим образом.

1. В ограничения внешних размеров проектируемой конструкции вписывается непрерывная упругая среда (**континуальная модель**), которая включает в себя все возможные силовые схемы. Потенциально такое тело содержит внутри себя все мыслимые силовые схемы, в том числе и оптимальные с точки зрения передачи усилий или близкие к ним, которые могут быть образованы сгустками материала внутри допустимой геометрической области.
2. Решается задача об оптимальном распределении материала в исходной континуальной модели и таким образом находится **теоретически оптимальная конструкция**.
3. Анализируются главные пути передачи сил в теоретически оптимальной конструкции и с учетом конструктивных и технологических требований разрабатываются рациональные варианты силовых схем.
4. Через силовой фактор оценивается относительная эффективность разработанных силовых схем и близость их к идеалу – теоретически оптимальной конструкции.

В [3] рассмотрены детали, связанные с реализацией этого плана для различных типов конструкций, включая произвольные пространственные упругие системы.

Для решения задачи об оптимальном распределении материала в исходной континуальной модели можно использовать методы нелинейного математического программирования (прямые методы оптимизации) [5,6]. Если объект проектирования моделируется МКЭ, то за проектные переменные чаще всего принимаются параметры  $X_i$ , описывающие размеры сечений конечных элементов (толщина пластины или площадь поперечного сечения стержня). При этом задача оптимизации конструкции обычно описывается большим количеством проектных переменных и функциональных ограничений, исчисляемым тысячами и даже десятками тысяч, что затрудняет подробное исследование области поиска и, следовательно, получение точных результатов. Это обстоятельство осложняется еще и тем, что методы нелинейного математического программирования используют "дорогую" (в смысле вычислительных затрат) процедуру анализа чувствительности ограничений на напряжения для множества точек конструкции по всем проектным переменным. Поэтому практический интерес представляет использование и развитие непрямых методов оптимизации упругих систем, которые могут обладать более высокой эффективностью за счет целенаправленного использования характерных свойств объекта проектирования.

В рамках непрямого подхода исходная задача оптимизации с ограничениями-неравенствами (эквивалентные напряжения во всех элементах конструкции не должны превышать допускаемых напряжений) заменяется косвенной. Постулируются необходимые условия, которым должна отвечать искомая конструкция, и строится процедура поиска этой конструкции. Условия оптимальности либо выводятся из математической постановки задачи, либо основываются на особенностях поведения, подмеченных для некоторых классов упругих систем. Для решения рассматриваемой задачи чаще всего используются критерии полнонапряженности и

наибольшей жесткости конструкций.

Конструкция называется *полнонапряженной* (равнопрочной), если во всех ее элементах, в которых сечение больше минимально допустимого значения, реализуется предельное напряженное состояние хотя бы в одном из случаев нагружений. Для поиска полнонапряженного проекта (ПНП) используется классическая формула отношения напряжений:

$$X_i^{(v+1)} = X_i^{(v)} \max_j (\sigma_{ij}) / [\sigma_i], \quad j=1, 2, \dots, s, \quad (8)$$

где  $\sigma_{ij}$ - эквивалентное напряжение в  $i$ -м элементе при  $j$ -м случае нагружения;  $[\sigma_i]$  - допускаемое напряжение для  $i$ -го элемента;  $s$  - количество случаев нагружений;  $v$  - номер итерации.

Достоинства метода - простота и высокая эффективность. Концепция ПНП не включает в себя в явном виде целевую функцию. Тем не менее алгоритм, построенный на соотношении (8), часто приводит к "рациональному" проекту.

В основу концепции поиска *наиболее жесткой конструкции* (НЖК) [7] положена идея замены совокупности ограничений на напряжения для множества точек упругой системы одной интегральной характеристикой - потенциальной энергией. Обзор работ, посвященных оптимальному проектированию конструкций на основе минимизации энергии деформации, содержится в монографии [8].

В работе [7] ищется конструкция с минимальной энергией деформации при неизменном объеме материала. Среди множества вариантов распределения некоторого заданного количества материала внутри объекта проектирования определяется такой, при котором деформации конструкции (а, следовательно, и напряжения) будут наименьшими. При единственном случае нагружения в НЖК удельные энергии деформаций всех элементов конструкции,

поперечные сечения которых больше минимально возможных, принимают одинаковые значения (разумеется, эти значения могут отличаться от допускаемых). Для перехода к реальной конструкции значения проектных переменных необходимо промасштабировать на коэффициент, который приведет максимальные напряжения конструкции в соответствие с условиями прочности. Отметим, что алгоритм поиска НЖК обладает высокой эффективностью. Как и в случае поиска полнонапряженного проекта, НЖК обычно удается определить за 5 -10 итераций.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Всю работу над проектом целесообразно разделить на следующие этапы:

1. Изучение и анализ задания на проектирование.
2. Разработка основных требований к проектируемому шпангоуту.
3. Разработка “традиционного” варианта силовой схемы шпангоута.
4. Разработка рационального варианта силовой схемы шпангоута на основе интуитивных соображений.
5. Оптимизация распределения материала в континуальной модели.
6. Анализ силовой работы теоретически оптимальной конструкции.
7. Разработка технологически реализуемых вариантов силовой схемы, максимально приближенных к теоретически оптимальной конструкции.
8. Сравнительный анализ разработанных вариантов силовой схемы шпангоута.



## 4. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 4.1. ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЗАДАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Работу над проектом следует начинать с изучения и уяснения задания. Предварительно выполняется эскиз как минимум двух силовых шпангоутов, представленных в самолетном классе кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. Шпангоуты для эскизирования выбираются так, чтобы они как можно точнее соответствовали условиям нагружения, представленным в задании на курсовой проект.

Составляется описание выбранных конструкций по следующей схеме:

- краткое описание самолета, на котором установлена конструкция;
- место установки и назначение шпангоута;
- материал и способ изготовления конструктивных элементов шпангоута (литье, штамповка, фрезерование и т. д.);
- возможный вариант расчетной схемы, используемый при конструировании деталей (стержень, балка, мембранная или сдвиговая пластина);
- способы соединения деталей (сварка, пайка, болтовое или заклепочное соединение);
- качественная оценка технологичности конструкции.

#### **Пример описания конструкции.**

Самолет Ил-28, фронтовой бомбардировщик.

Создан в ОКБ им. С.В. Ильюшина в 1948г. Выпускался крупной серией. Экипаж 3 человека.

Максимальная дальность – 2260 км.

Максимальная скорость – 900 км/ч.

Практический потолок – 12300 км.

Взлетная масса – 21000кг

Длина самолета – 17,65 м.

Высота самолета – 6,2 м.

Размах крыла – 21,45 м.

Площадь крыла – 60,8 м<sup>2</sup>.

Шпангоут установлен в хвостовой части фюзеляжа и служит для крепления переднего лонжерона киля к фюзеляжу.

Радиус фюзеляжа  $R$  в зоне установки шпангоута около 1 м. Шпангоут имеет переменную строительную высоту. В верхней части шпангоута строительная высота около  $0,25R$ . К боковинам фюзеляжа она плавно увеличивается до  $0,4R$ . К нижней зоне шпангоута строительная высота уменьшается до  $0,07R$ .

Конструктивно шпангоут состоит из внешних и внутренних поясов, стенки, ребер жесткости и фитингов.

Внешний пояс состоит из 6 деталей уголкового профиля. Все детали выполнены из деформируемого алюминиевого сплава методом горячей штамповки, соединены между собой болтами. Возможная расчетная схема – стержень с переменной площадью поперечного сечения, работающий на растяжение-сжатие. В верхней части площадь поперечного сечения стержня наибольшая и плавно уменьшается к нижней части. Внешний пояс соединен с обшивкой фюзеляжа заклепками. Стрингеры разрезные и стыкуются между собой через внешний пояс шпангоута. Для перестыковки некоторых силовых стрингеров используются фитинги.

Внутренний пояс состоит из 3 деталей уголкового профиля. Все детали выполнены из деформируемого алюминиевого сплава методом горячей штамповки, соединены между собой болтами. Возможная расчетная схема – стержень с переменной площадью поперечного сечения, работающий на растяжение-сжатие. В верхней

части площадь поперечного сечения стержня наибольшая и плавно уменьшается к нижней части.

Стенка выполнена из листовой заготовки постоянной толщины. В верхней и боковых зонах имеются накладки постоянной толщины, соединенные со стенкой с помощью заклепок. Так как к стенке приклепаны ребра жесткости, то стенка не будет терять устойчивость до высокого уровня напряжений. Поэтому возможная расчетная схема для стенки – мембранная пластинка постоянной толщины.

В верхней зоне к стенке шпангоута болтами прикреплены два стальных фитинга, через которые передаются усилия от узлов навески переднего лонжерона кия.

Достоинствами с точки зрения технологичности шпангоута являются широкое применение технологических процессов на основе штамповки и отсутствие таких дорогостоящих процессов, как химическое травление или фрезерование, использование недорогих и недефицитных материалов, максимальная унификация элементов конструкции, материалов и полуфабрикатов. Недостатком является большое количество деталей и конструктивных разъемов.

**Анализ задания на проектирование.** Далее необходимо выяснить возможные генеральные пути передачи приложенных сосредоточенных сил к оболочке, а также возможные типы конструктивных силовых элементов для исходных данных задания на курсовой проект. Для этого выполняются эскизы, и дается описание возможных вариантов силовых схем шпангоута. В качестве примера рассмотрим задачу, представленную на рис. 4.

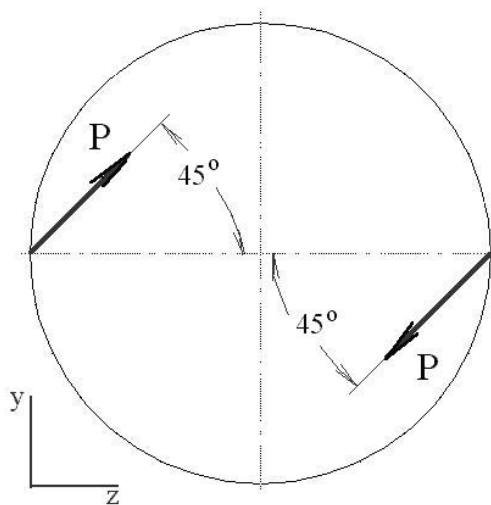


Рисунок 4. Пример варианта задания

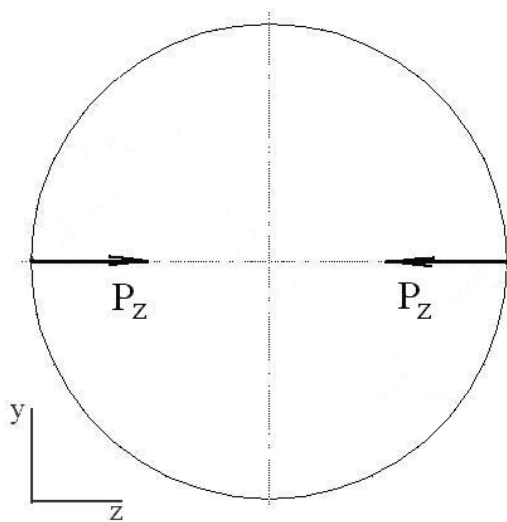


Рисунок 5. Силы  $P_z$

Разложим силы  $P$  по координатным осям  $y$  и  $z$ . Силы  $P_z$  (рис. 5) являются самоуравновешенными. Оптимальное решение для их передачи очевидно. Необходимо «связать» эти силы по кратчайшему пути стержневым элементом. При этом в стержне возникнут только сжимающие усилия. Если центральная часть шпангоута по компоновочным соображениям не может быть использована для размещения силовых элементов, то передача сил  $P_z$  возможна через ферменный или рамный вариант конструкции.

Силы  $P_y$  (рис. 6) создают крутящий момент, который необходимо передать на крепления. Если предположить, что проектируемый шпангоут обладает абсолютной жесткостью в своей плоскости, то при этом в цилиндрической оболочке возникнет равномерный поток касательных сил.

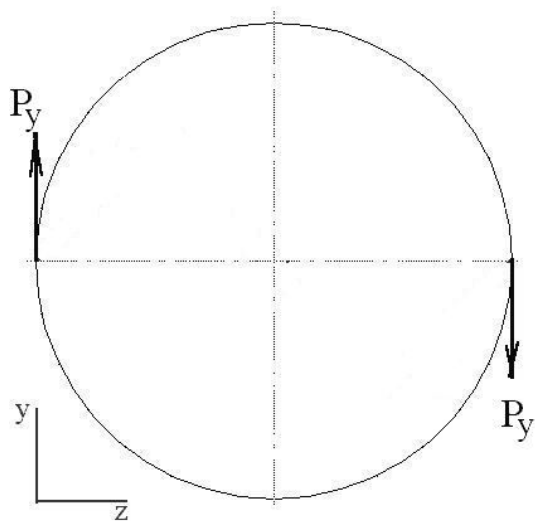


Рисунок 6. Силы  $P_y$

В случае шпангоута с конечной (реальной) жесткостью на контуре стыка в цилиндрической оболочке возникнут касательные усилия переменной величины с максимумом в зонах приложения сил.

Для передачи сил  $P_y$  возможен ферменный, стеночный или рамный вариант конструкции.

## 4.2. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ШПАНГОУТУ

Требования к шпангоуту вытекают из совокупности свойств, которыми должно обладать проектируемое изделие. При проектировании изделия они играют роль директивных установок, которые должны быть выполнены. В процессе разработки требований к шпангоуту необходимо помнить, что он является элементом более сложной упругой системы – фюзеляжа самолета.

Требования могут выражаться либо количественно (например, может быть задан ресурс агрегата в часах), либо качественно (например, требование обеспечить максимальную жесткость фюзеляжа в зоне установки шпангоута). В пояснительной записке должны быть приведены четко сформулированные требования (хотя бы качественные) с кратким обоснованием принятых значений.

В авиации исходными данными для разработки требований к агрегату в реальном проектировании являются **Нормы летной годности**, **Нормы прочности**, технические условия заказчика, материалы эскизного проектирования самолета. Все требования обычно делятся на функциональные, эксплуатационные, производственно-технологические и экономические требования.

**Функциональные требования** представляют собой перечень основных функций, выполняемых агрегатом на самолете, а

также перечень свойств агрегата, без которых выполнение его функций невозможно. К функциональным требованиям относятся требования минимальной массы, необходимой прочности и жесткости агрегата, устойчивости и долговечности элементов конструкции, а также аэродинамические и компоновочные требования. *Отметим, что компоновочные ограничения обязательно согласовываются с руководителем проекта.*

**Эксплуатационные требования** регламентируют удобство, трудоемкость и периодичность обслуживания агрегата, определяют степень его ремонтпригодности.

Группа **производственно-технологических требований** включает в себя общие указания по материалам и технологии, определяет программу выпуска агрегата в зависимости от его расчетного ресурса, задает требования к взаимозаменяемости агрегата, количество и расположение эксплуатационных и технологических разъемов, определяет степень преемственности конструкции. Следует иметь в виду, что с точки зрения минимума массы конструкции число эксплуатационных, конструктивных и технологических разъемов должно быть минимальным.

Производственно-технологические требования должны ориентировать конструктора на самое широкое применение передовых технологических процессов, повышение уровня механизации и автоматизации производства, использование недорогих и недефицитных материалов, максимальную стандартизацию и унификацию элементов конструкции, материалов и полуфабрикатов с целью уменьшения трудоемкости изготовления агрегата, сокращения цикла сборки и сроков освоения производства. При этом следует учитывать влияние технологичности производства агрегата на его функциональные свойства, особенно на ресурс и надежность в эксплуатации.

Достаточно общим **экономическим критерием** объекта проектирования является относительный уровень эффективности самолета – отношение производительности самолета за все время его эксплуатации к суммарным затратам на всех этапах жизненного цикла продукта. Экономическая эффективность транспортных средств может также оцениваться себестоимостью перевозок, исчисляемой в рублях/тонно-километр, а военных – стоимостью выполнения боевой задачи. В курсовом проекте значение какого-либо из указанных экономических критериев определить затруднительно. Поэтому экономический критерий можно сформулировать как требование, обеспечивающее минимальную себестоимость изготовления шпангоута.

Отметим, что все требования взаимосвязаны, а многие требования противоречат друг другу. Например, если сравнивать два варианта конструкции, то более легкая конструкция, как правило, оказывается менее технологичной, более дорогой в изготовлении. Изменение степени выполнения каждого требования в отдельности может либо улучшить, либо ухудшить качество изделия в целом. Поэтому задача конструктора – *найти наилучшее компромиссное решение, определить наиболее полную степень удовлетворения в проектируемом изделии каждого из требований с учетом предполагаемых конкретных условий производства*. Идеальной можно считать ситуацию, когда конструктор знает оптимальное решение, каким бы сложным оно не было в технологическом отношении, а также знает и цену, то есть увеличение массы при использовании более простого решения.

Заметим также, что понятие «сложная конструкция» достаточно относительное. На 47-м аэрокосмическом салоне в 2007 году были продемонстрированы сложнейшие конструкции шпангоутов и окантовок вырезов, изготовленные литьем и с использованием станков с программным управлением. Причем



фирмы-изготовители утверждают, что это экономически более выгодно: вместо десятков деталей – одна, крепеж – заклепки и болты – практически отсутствуют.

#### **4.3. РАЗРАБОТКА “ТРАДИЦИОННОГО” ВАРИАНТА СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА**

Разработку рационального варианта шпангоута при заданных граничных условиях начнем с рассмотрения "традиционного" шпангоута с постоянной строительной высотой  $0,1 R$  - вариант "Тг". Для анализа весовой эффективности этой силовой схемы необходимо создать конечно-элементную модель (КЭМ). Примерное рекомендуемое разбиение конструкции сетью конечных элементов представлено на рисунке 7.

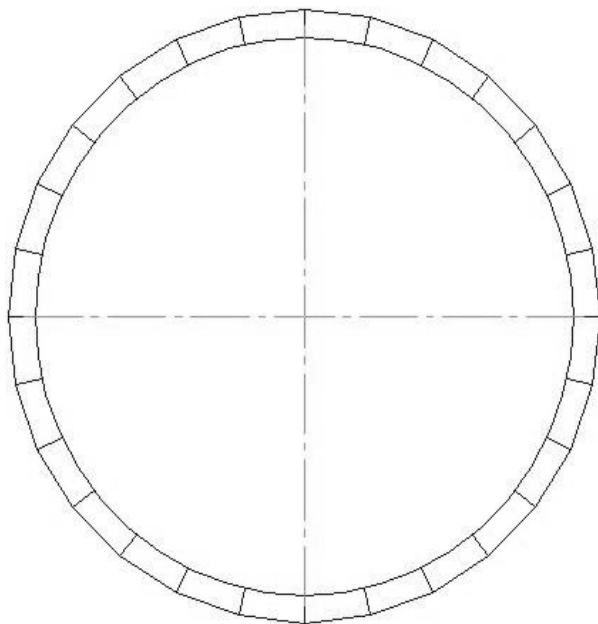


Рисунок 7. Рекомендуемое разбиение конструкции сетью КЭМ

Следует учесть, что конструктивно "традиционный" шпангоут состоит из поясов, адекватно моделируемых стержневыми элементами Rod из библиотеки конечных элементов NASTRAN [4], и стенки, работающей в плоском (мембранном) напряженном состоянии. При моделировании цилиндрической оболочки предполагаем, что используется фюзеляж типа "монокок" и поэтому можно выбрать конечные элементы Membrane.

Для заданного случая нагружения выполняется статический расчет и производится анализ напряженно-деформированного состояния конструкции.

Таким образом, определение силового фактора  $G$  является ключевым моментом в весовом анализе проектируемой конструкций. Для определения силового фактора и объема материала совокупности элементов, моделирующих шпангоут при заданном случае нагружения, можно воспользоваться специально написанной программой **G\_factor** (автор – Болдырев А.В.). Оценку реальной массы конструкции можно выполнить по соотношению (6). Здесь и далее коэффициент полной массы рекомендуется принять  $\varphi = 2,0$ .

Для оценки влияния соотношения жесткостей оболочки и шпангоута на распределение внутренних усилий в зоне их контакта выполняются расчеты шпангоута с оболочкой, имеющей толщину 0,1 мм, 1 мм и 10 мм. Делается проверка равновесия, для чего строятся эпюры уравнивающих потоков касательных сил в оболочке с использованием сдвиговых напряжений (номер 7023 вектора результатов) [4].

#### **4.4. РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА НА ОСНОВЕ ИНТУИТИВНЫХ СООБРАЖЕНИЙ**

Каждый студент разрабатывает рациональный вариант силовой схемы шпангоута для своего случая нагружения, опираясь на результаты анализа задания (раздел 2.2) и интуитивные соображения, и согласует его эскиз с преподавателем.

Далее для "интуитивного" шпангоута – вариант "Int" создается КЭМ, производится статический расчет и выполняется анализ напряженно – деформированного состояния конструкции, определяется силовой фактор и делается проверка равновесия для шпангоута с оболочкой, имеющей толщину 1 мм.

Затем по усилиям в элементах конструкции подбираются размеры прочных сечений – площади поперечных сечений поясов и толщина стенки. Для нового распределения материала определяются силовой вес и масса конструкции. Сравниваются значения силового фактора и массы конструкции для разных вариантов распределения материала.

#### **4.5. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ**

**Первый этап** решения поставленной задачи отыскания рациональной силовой схемы конструкции по намеченному в разделе 2 плану – выбор континуальной модели – для плоского шпангоута тривиален. Это – изотропная пластинка переменной толщины.

**Второй этап** решения также не вызывает принципиальных затруднений. Для поиска оптимальной силовой схемы шпангоута создается конечно-элементная модель пространственной конструкции, которая состоит из изотропной плоской круглой

пластинки и цилиндрической оболочки. Эта дискретная модель должна быть достаточно адекватной континуальной модели, которая выбрана для порождения искомой конструкции. Будем называть такие конечно-элементные модели первого уровня – КЭМ-1. Рекомендуется пластинку разбить на 150-250 конечных элементов. При генерации конечно-элементной сетки следует учитывать, что наилучшую точность имеют элементы в форме квадрата, допускается также использование прямоугольников и элементов с небольшим отклонением от этих форм.

При оптимизации распределения материала в КЭМ-1 начальная толщина оболочки 1 мм остается фиксированной. Начальная толщина пластинки 1 мм и далее меняется без ограничений. Отметим, что толщины в пластине должны изменяться в процессе оптимизации независимо во всех элементах. Прежде чем создавать оптимизационную модель NASTRAN, необходимо решить вопрос создания множества свойств (Property) для того, чтобы ссылаться на них при задании переменных и ограничений. Разумеется, можно создать вручную около 150-250 свойств для конечных элементов типа Membrane. Затем модифицировать элементы, моделирующие пластину так, чтобы поставить в соответствие каждому элементу уникальное свойство. Однако более удобно решить этот вопрос, используя программу **Update\_prop\_3**. При этом предварительно необходимо создать только два свойства. Свойство №1 для элементов, моделирующих оболочку, и свойство №2 для элементов шпангоута. Далее запускается программа **Update\_prop\_3** и в режиме диалога выбираются элементы, моделирующие шпангоут. В результате, во-первых, для каждого элемента шпангоута будет создано уникальное свойство со значениями материала и толщины элемента, соответствующими значениям свойства №2, во-вторых, каждому выбранному элементу будет поставлено в соответствие уникальное свойство.

Для оптимизации распределения материала в КЭМ-1 можно использовать подсистему Design Optimization NASTRAN [4] на основе метода «проекции градиента» или специально написанную программу **ОПТМЕМБР**, использующую алгоритм поиска полнонапряженной (равнопрочной) конструкции. Делается 10-25 итераций оптимизации конструкции по условиям прочности. В качестве критерия сходимости оптимизационного процесса можно использовать условие постоянства значений массы конструкции на текущей и предыдущей итерациях с учетом относительной невязки ограничений на напряжения.

#### **4.6. АНАЛИЗ СИЛОВОЙ РАБОТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

На **третьем этапе** нужно анализировать главные пути передачи сил в теоретически оптимальной конструкции. Традиционные эпюры или цветографические картины нормальных и касательных напряжений не могут дать четкого представления о главных путях передачи сил в полученной пластинке переменной толщины. То же самое, хотя и в меньшей мере, можно сказать о потоках усилий в определенной декартовой системе координат.

Для анализа этих путей определим в каждом элементе главные напряжения. Умножение их на толщины элементов дает потоки главных усилий, которые также будем называть главными. Стандартные средства NASTRAN не позволяют визуализировать главные усилия в модели. Поэтому после проведения статического расчета конструкции необходимо запустить программу **PGU**, которая вычислит главные усилия и запишет их в вектора результатов с номерами 7426 и 7427. Потоки главных усилий (ПГУ) в конструкции изобразим на чертеже так: направление стрелок и их ориентацию в каждом элементе сохраним такими же, как у главных напряжений, а длину стрелок назначим пропорционально величинам

потоков усилий. При назначении опций для визуализации векторов (Contour vector style) рекомендуется выбрать вариант "двойных" стрелок в центре элемента (center, dual arrow). Это позволит выделить в конструкции сжатые и растянутые зоны.

Одна картина ПГУ в рассматриваемой теоретически оптимальной конструкции дает наглядное и четкое представление о силовой работе конструкции в целом, о способе передачи усилий в ней.

#### **4.7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМЫХ ВАРИАНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ, МАКСИМАЛЬНО ПРИБЛИЖЕННЫХ К ТЕОРЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Силовая схема шпангоута, как правило, определяется количеством, расположением и формой силовых элементов (стенки, балок, внутренних и внешних поясов, ребер жесткости, фитингов и т. д.), а также способами их соединения.

Процесс выбора рациональных вариантов силовых схем, с одной стороны, наиболее близких к идеалу - ТОК, с другой стороны, учитывающих конструктивные и технологические требования к проектируемому изделию, к сожалению, невозможно представить в форме алгоритма и, следовательно, полностью автоматизировать.

Эвристическая программа, соответствующая этому процессу, может быть представлена в следующем виде. Первое приближение к выбору рациональной структуры синтезируемого объекта может дать информация о расположении сгустков жесткости и зон с "разреженной" жесткостью в ТОК. Граница вырожденных и невырожденных элементов определит контур силовой части проектируемой упругой системы. Если эта граница не является четко выраженной, то далее целесообразно прорабатывать несколько вариантов структуры конструкции. Анализ путей передачи сил в

континуальной модели "подскажет" тип силовых элементов и их расположение в пространстве. Так, "хребты" повышенных толщин пластинки, в которых материал работает в одноосном напряженном состоянии, вполне могут трактоваться как стержневые элементы. Зоны континуальной модели, в которых материал испытывает касательные напряжения, могут интерпретироваться как мембранные стенки или как система перекрестных стержней в искомой конструкции. Места и способы рационального соединения элементов конструкции могут определиться также в результате сравнения различных вариантов решения этих вопросов.

Для каждого варианта "рационального" шпангоута – варианты "Rat" – создается конечно-элементная модель второго уровня КЭМ-II, производится статический расчет и выполняется анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, определяется силовой фактор и делается проверка равновесия для шпангоута с оболочкой, имеющей толщину 1 мм.

Затем по усилиям в элементах конструкции подбираются размеры прочных сечений – площади поперечных сечений поясов и толщина стенки. Для нового распределения материала определяются силовой вес и прогнозируемая масса конструкции. Сравниваются значения силового фактора для разных вариантов распределения материала.

#### **4.8. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТАННЫХ ВАРИАНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ШПАНГОУТА**

Одним из самых сложных и ответственных является **четвертый этап** решения поставленной задачи по намеченному в разделе 2.6 плану. В процессе проектирования шпангоута разработаны ТОК и несколько технологически реализуемых вариантов шпангоута "Rat", " Int" и " Tr" для рассматриваемого случая нагружения. К проектируемой конструкции предъявляются

разнообразные требования, которые сформулированы в разделе 2.3. Для выбора наилучшего варианта силовой схемы шпангоута, следовательно, необходимо рассматривать сложную многокритериальную задачу. Эта задача, как правило, не имеет однозначного решения и зависит от мнения Эксперта, который "ранжирует" требования по их влиянию на качество изделия в целом.

Для авиационных конструкций обычно наиболее приоритетным критерием качества является требование минимума массы конструкции при выполнении всех функциональных требований. Поэтому при сравнении различных вариантов шпангоута рекомендуется сразу отбросить варианты, для которых не выполняются условия прочности (то есть нарушаются функциональные требования) и которые имеют значительно большую массу по сравнению с остальными. Для оставшихся вариантов можно выполнить сравнительный анализ с использованием всех критериев качества проектируемого изделия – прогнозируемой массы, прочности, жесткости, производственной технологичности конструкции и т. д. На этом этапе необходимо выделить проекты, принадлежащие множеству Парето (или области компромиссов). Каждый из оставшихся проектов, если он "проигрывает" какому-либо варианту конструкции по одному или нескольким критериям качества изделия, то должен "превосходить" этот вариант хотя бы по одному другому критерию качества.

Таким образом, в результате сравнительного анализа должен появиться либо наилучший вариант, либо «конкурентоспособные» варианты силовой схемы шпангоута.



## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и презентации в электронном виде. В курсовом проекте должны найти отражение следующие данные и результаты.

1. Описание проектной задачи. Обоснование "интуитивного" варианта конструкции. Эскизы вариантов шпангоута.
  2. Описание КЭМ-I.
  3. Графики изменения массы конструкции (целевой функции) и функций максимально нарушенных ограничений по итерациям при поиске ТОК.
  4. Распределение материала и картины ПГУ в теоретически оптимальной конструкции.
  5. Описание КЭМ-II и результатов анализа напряженно-деформированного состояния для силовых схем "Rat", "Int" и "Tr".
  6. Распределение материала в конструкции после оптимизации для каждой из силовых схем шпангоута.
  7. Гистограммы значений силового фактора и потребной по прочности массы для ТОК и всех вариантов силовых схем шпангоута "Rat", "Int" и "Tr".
  8. Эпюры уравнивающих потоков касательных сил в оболочке
    - для КЭМ-I на начальной и конечной итерациях;
    - КЭМ-II, вариант "Rat";
    - КЭМ-II, вариант "Int";
    - КЭМ-II, вариант "Tr".
- Для варианта "Tr" КЭМ-II даются результаты дополнительных расчетов с толщиной оболочки 0,1 мм и 10 мм.
9. Анализ результатов работы и выводы.

Ориентировочный объем пояснительной записки, набранной в редакторе Microsoft Word – 25-30 страниц формата А4, кегль – 14, междустрочный интервал - полуторный. Примеры оформления рисунков представлены в Приложении на рисунках П1 – П5.

Презентация содержит около 25-30 слайдов.

Примерное время на доклад с использованием электронной интерактивной доски 5-7 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

(основной)

1. Житомирский, Г. И. Конструкция самолетов/ Г. И. Житомирский – М.: Машиностроение, 1995. – 416 с.
2. Корольков, О. Н. Проектирование местных усилений каркасных агрегатов самолета/ О.Н. Корольков - Самара: СГАУ, 1997. - 64 с.
3. Комаров, В. А. Автоматизация проектирования авиационных конструкций/ В.А. Комаров - Самара: СГАУ, 1993. - 72 с.
4. Рычков, С. П. MSC visual NASTRAN для Windows/ С.П. Рычков - М.: ИТ Пресс, 2004. - 552 с.

(дополнительной)

5. Хог, Э. Прикладное оптимальное проектирование/ Э. Хог, Я. Арора - М.: Мир, 1983.
6. Новые направления оптимизации в строительном проектировании / М.С. Андерсон, Ж.Л. Арман, Я. Арора [и др.] - М.: Стройиздат, 1989.
7. Комаров, А.А. Основы проектирования силовых конструкций/ А.А. Комаров - Куйбышев: 1965. - 82 с.
8. Пустовой, Н.В. Оптимальное проектирование стержней и подкрепленных пластин на основе минимизации энергии деформации/ Н.В. Пустовой, Г.И. Расторгуев - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2002.
9. Комаров, В.А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций/ В.А. Комаров // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. - М.: Машиностроение, 1984. С.114-129.
10. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов/ И.П. Норенков - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002.-336с.

11. Управление жизненным циклом продукции/ А.Ф.Колчин, М.В.Овсянников, А.Ф.Стрекалов [и др.] - М.: Анахарсис, 2002.- 304 с.
12. Методы оптимизаций авиационных конструкций / Н.В.Баничук, В.И. Бирюк, А.П. Сейранян [и др.] – М.: Машиностроение, 1989.
13. Комаров, В.А. Повышение жесткости конструкций топологическими средствами/ В.А. Комаров // Вестник СГАУ. Самара. 2003. №1. - С.24-37.
14. Комаров, В.А. К доказательству теоремы об изменении жесткости конструкций/ В.А. Комаров // Вестник СГАУ. Самара. 2004. №1. - С.49-51.
15. Комаров, В.А. Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы/ В.А. Комаров // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2000. №1. - С.31-39.
16. Болдырев, А.В. Оптимизация тонкостенной каркасированной конструкции с ограничениями по прочности и жесткости/ А.В. Болдырев, В.А. Комаров // Вестник СГАУ. Самара. 2006. №1. - С.42-47.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

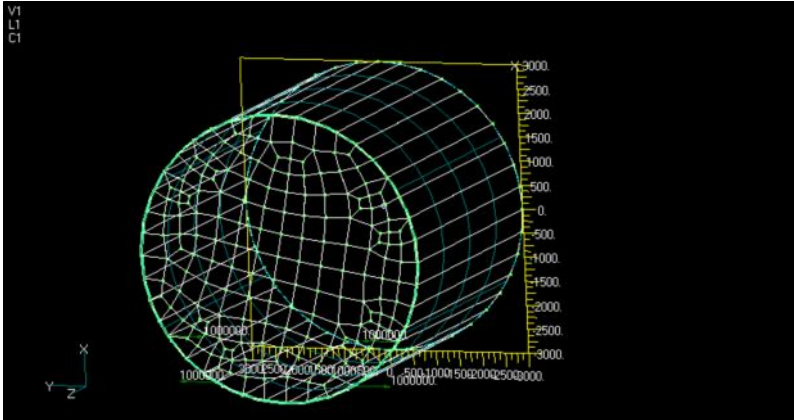


Рисунок П1. КЭМ-1

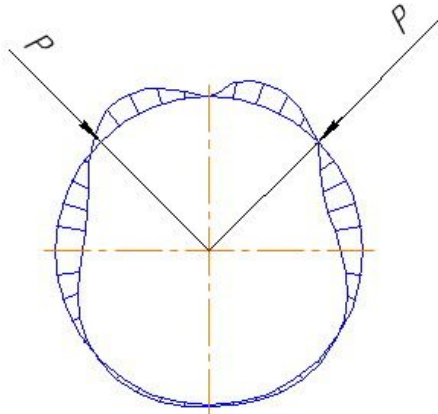


Рисунок П2. Эпюры уравнивающих потоков касательных сил в оболочке 1 мм

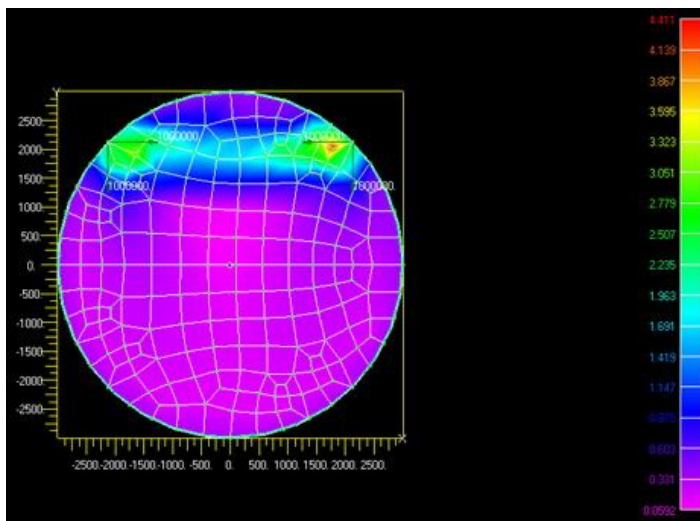


Рисунок П3. Распределение материала в ТОК

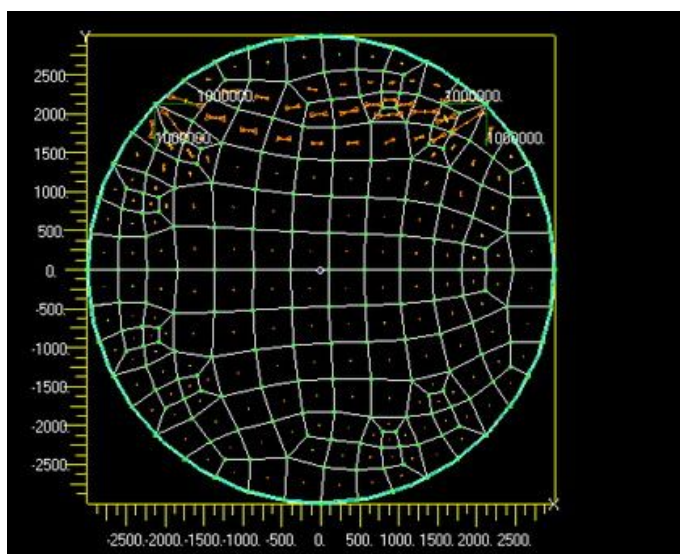


Рисунок П4. ПГУ в ТОК

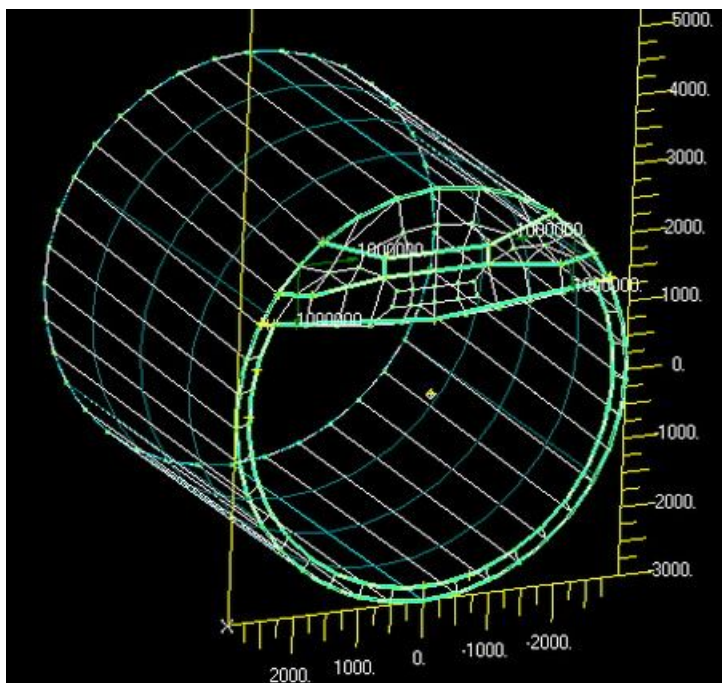


Рисунок П5. КЭМ-П для "интуитивного" варианта

Учебное издание

Составители: ***Болдырев Андрей Вячеславович,***  
***Комаров Валерий Андреевич***

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
СИЛОВЫХ ШПАНГОУТОВ**

*Методические указания*

Технический редактор Г. А. Резниченко  
Редакторская обработка Л. Я. Чегодаева  
Корректорская обработка Е. П. Сеничкина  
Доверстка Т. К. Крестина

Подписано в печать 6.11.07. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 2,5.

Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж100/2007

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.