

УДК 629.735.33

## **Выбор рациональной схемы силовых шпангоутов фюзеляжа истребителя интегральной компоновки**

Попов Ю.И., Столяров Д. В.

### **Аннотация**

В статье рассматриваются особенности конструкции хвостовой части фюзеляжа самолетов интегральной компоновки. Рассматриваются влияние параметров формы поперечного сечения на выбор рациональной схемы силовых шпангоутов.

### **Ключевые слова:**

конструкция; шпангоут; нагрузка; масса; параметры.

### **Введение**

Создание перспективного истребителя пятого поколения интегральной компоновки связано с решением множества сложных задач в различных областях проектирования самолета. Одной из таких сложных задач является проектирование силовых элементов каркаса фюзеляжа.

Вопросы проектирования силовых элементов фюзеляжа касаются:

- схем заделки силовых элементов
- размерности и особенностей формы силовых элементов
- конструктивных схем силовых элементов
- технологических особенностей и эксплуатационных требований

Самолеты МиГ-29 и Су-27 являются наиболее близкими по форме и компоновке фюзеляжа к перспективному истребителю. Не смотря на внешнюю схожесть, технические решения внутренних силовых элементов каркаса этих двух истребителей существенно отличаются.

Для того чтобы обосновать выбор тех или иных технических решений принимаемых при проектировании фюзеляжа интегральной компоновки необходимо провести анализ конструкции основных силовых элементов фюзеляжа интегральной компоновки существующих самолетов.

### **Обоснование актуальности темы**

В результате предварительного анализа компоновок существующих истребителей было определено, что взаиморасположение основных агрегатов в фюзеляже интегральной схемы зависит от следующих требований:

- Эффективной работы двигателя;
- боевой живучести;
- эксплуатационных требований;
- размещения отсеков вооружения внутри фюзеляжа

Анализ возможных решений проблем проектирования конструкции подобного фюзеляжа выявил наиболее сложную часть фюзеляжа и множество особенностей, которые в значительной степени усложняют процесс проектирования. Вот основные из этих особенностей:

1. Хвостовая часть фюзеляжа (ХЧФ) - плоский и широкий агрегат
2. Внутренняя компоновка делит ХЧФ на продольные отсеки
3. Количество продольных отсеков определяется компоновкой двигателей
4. ХЧФ - наиболее нагруженная часть фюзеляжа
5. ХЧФ имеет частый поперечный силовой набор

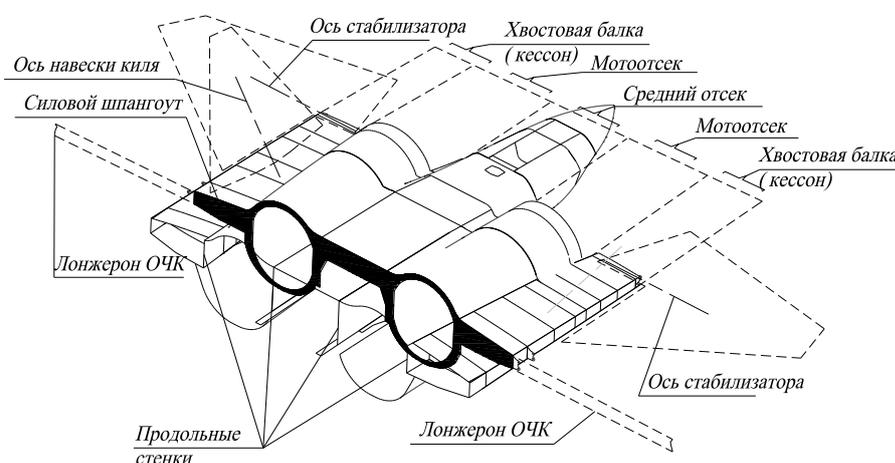


Рис. 1 Компоновочная схема хвостовой части фюзеляжа (ХЧФ).

В связи с этим можно сформулировать пункты, которые обосновывают актуальность темы.

1. Интегральная компоновка фюзеляжа является базовой для перспективных истребителей
2. Большой относительный вес силовых шпангоутов в конструкции фюзеляжа
3. Сложная форма силовых шпангоутов
4. Неоднозначность выбора конструктивной и силовой схемы шпангоута

5. Отсутствие простого способа разрешения этой неоднозначности без проекторочного расчета на прочность

Эти пункты дают возможность конкретизировать область и объект исследования. Областью исследования является проектирование конструкции фюзеляжа перспективного истребителя интегральной компоновки. А объектом исследования являются поперечные силовые элементы хвостовой части фюзеляжа (ХЧФ).

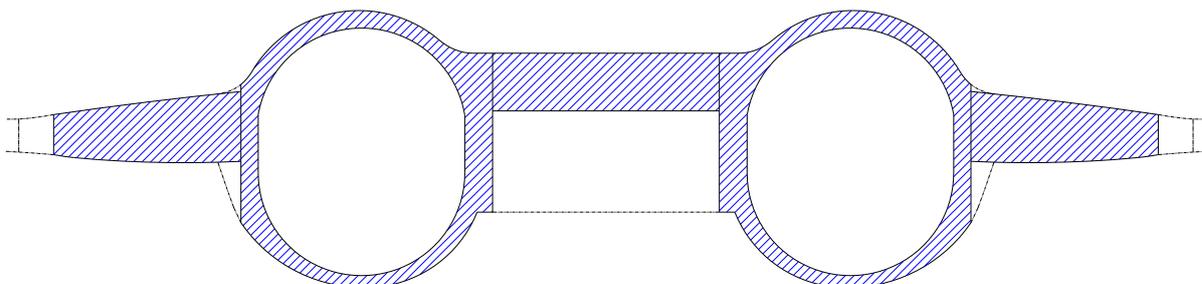


Рис. 2 Вид поперечного силового элемента хвостовой части фюзеляжа.

### Предварительный анализ статистики

Ввиду выше сказанного возникает необходимость в общем статистическом анализе поперечных сечений истребителей интегральной компоновки. В результате этого анализа были получены матрицы форм поперечных сечений фюзеляжа, а так же введено деление фюзеляжа на продольные отсеки.

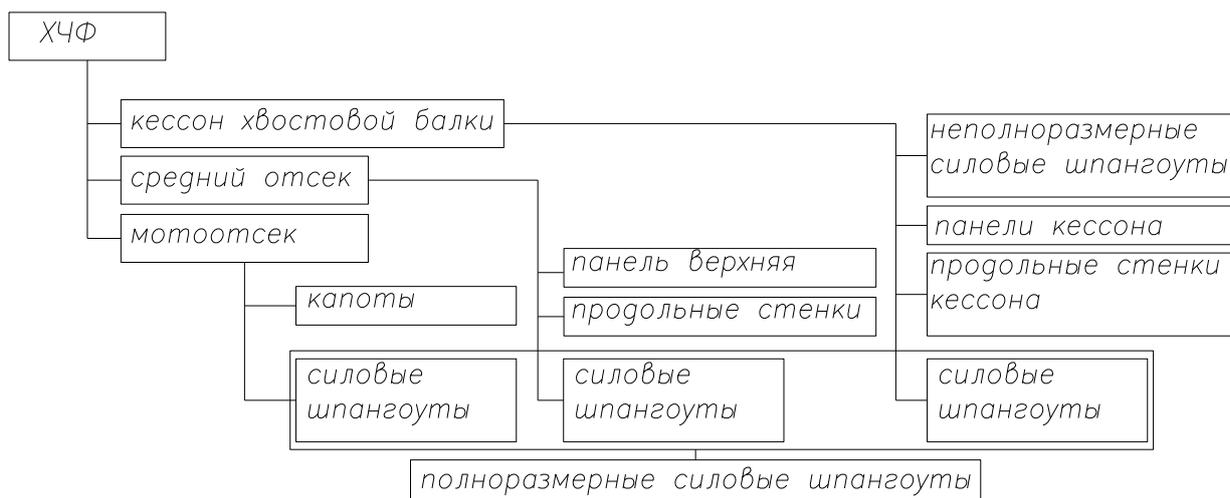


Рис. 3 Структурная декомпозиция элементов конструктивной схемы ХЧФ.

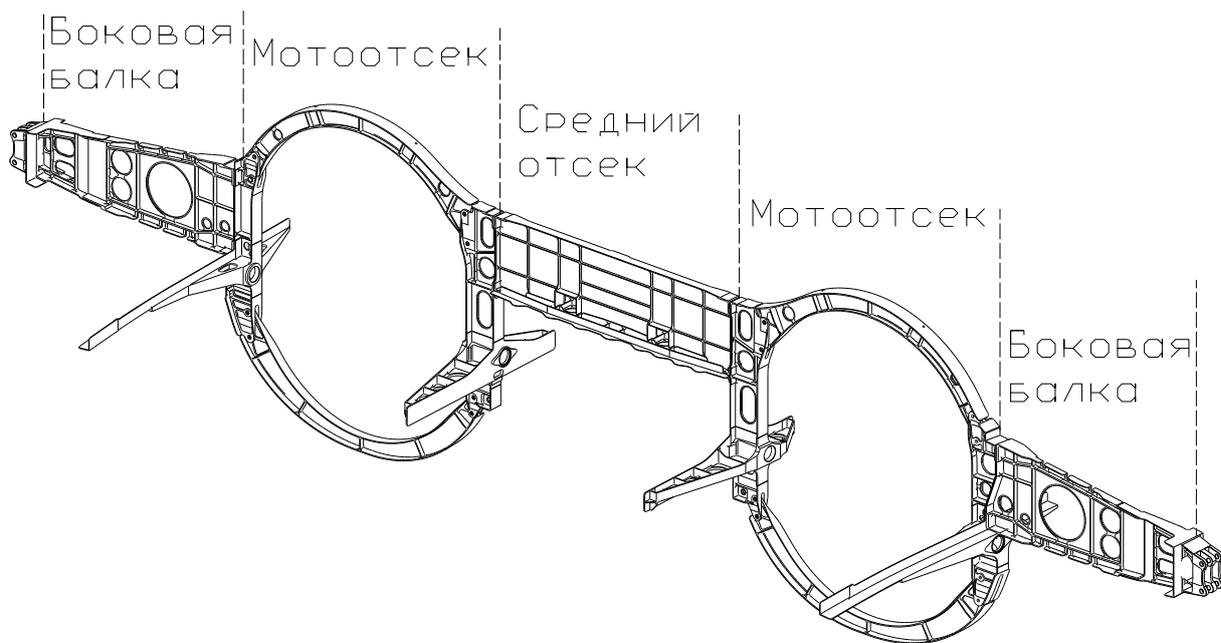
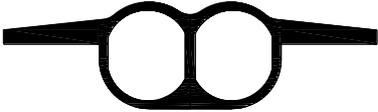
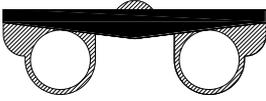
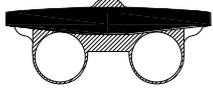
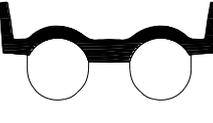


Рис. 4 Конструктивная схема силового шпангоута ХЧФ.

	С-37	Су-27	МиГ-29	ПИ
СЧФ				
ХЧФ				

Рис. 5 Поперечные сечения фюзеляжа истребителей интегральной компоновки.

Кроме этого показаны части шпангоутов фюзеляжа участвующие в работе на изгиб, и части конструкции исключенные из этого процесса.

С-37	Су-27	МиГ-29
		
		

■ - Силовая часть шпангоута

▨ - Конструктивная часть шпангоута

Рис. 6 Конструктивные и силовые части шпангоутов истребителей интегральной компоновки.

### Цели и задачи

В результате данного анализа была получена возможность сформулировать основную цель и задачи исследования. Целью работы является создание инструмент выбора рациональной схемы силовых шпангоутов фюзеляжа интегральной компоновки. В задачи исследования входит:

1. Классификация конструктивных схем и схемы заделки силовых шпангоутов
2. Классификация формы силовых шпангоутов и параметры формы
3. Статистический анализ влияния формы и схемы на массу шпангоута
4. Силовой анализ влияния формы на распределение нагрузки в частях шпангоута
5. Разработка обобщенного параметра оценки весовой эффективности схемы
6. Разработка семейства графиков и таблиц выбора схемы шпангоута в зависимости от его формы.

Результатами выполнения поставленных задач должны стать:

- 1) Классификационные матрицы
- 2) Статистические зависимости массы от параметров формы
- 3) Зависимости распределения нагрузки от параметров формы
- 4) Сравнительные номограммы
- 5) Алгоритм применения полученных зависимостей при проектировании

### Классификация схем силовых шпангоутов

Для выполнения задачи классификации шпангоутов необходимо провести классификацию форм и схем силовых шпангоутов. Для начала необходимо ввести два понятия о схеме силового шпангоута.

1. Под схемой силового шпангоута можно понимать схему заделки и приложения нагрузок. В таком случае анализ показывает, что нагрузка на силовые шпангоуты ХЧФ и СЧФ приходит в виде сосредоточенного момента и перерезывающей силы, приложенных на узлах навески агрегатов крыла и оперения.

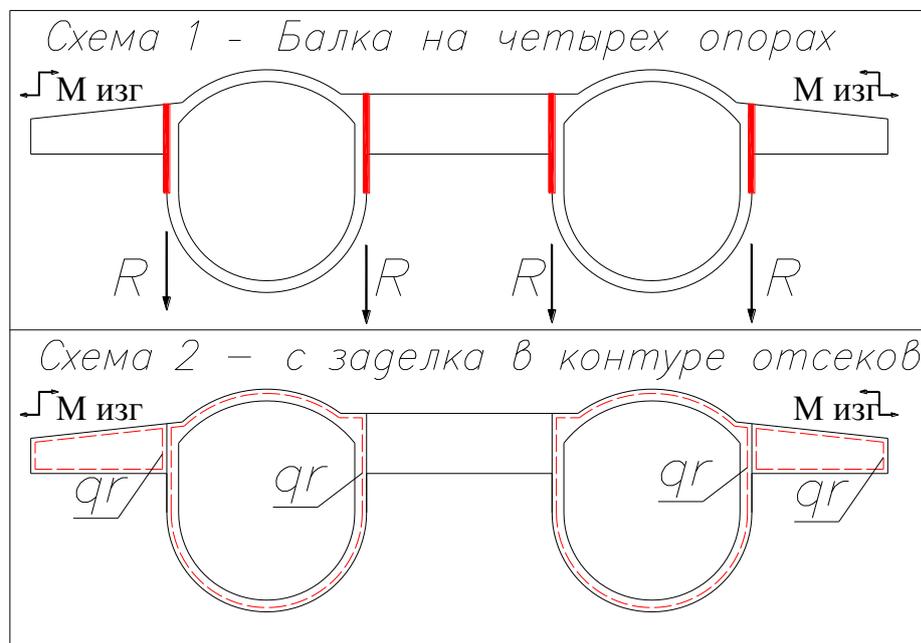


Рис. 7 Способы заделки силового шпангоута в конструкции ХЧФ.

Заделка силового шпангоута определяется соотношением жесткости контуров отсеков на кручение и жесткостью продольных стенок отсеков на изгиб. В реальности существует статическая неопределимость между этими двумя схемами заделки. Соответственно силовой шпангоут интегрального фюзеляжа может представлять собой балку на четырех опорах, в случае опирания его на продольные стенки отсеков, а так же может представлять собой поперечный силовой элемент заделанный в сложном контуре поперечного сечения фюзеляжа. Это и есть основные пункты, характеризующие схему заделки силового шпангоута интегрального фюзеляжа.

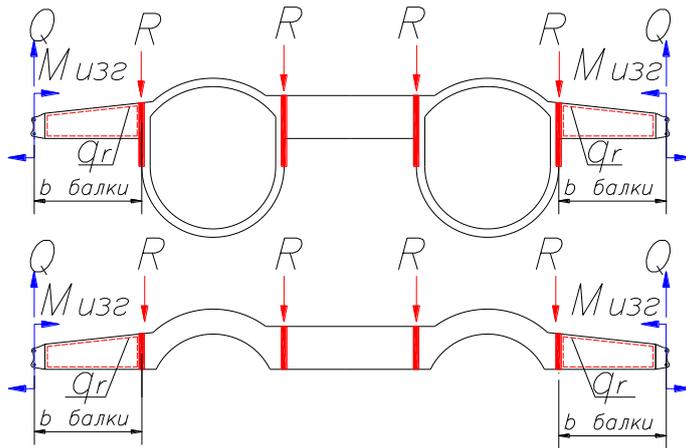


Рис. 8 Рассматриваемые схемы заделки силового шпангоута.

Результат анализа схем заделки позволяет четко сформулировать задачу силового анализа, а именно: определить влияние параметров формы на распределение нагрузки в шпангоутах при условии данной схемы заделки.

2. Так же схемой силового шпангоута может являться схему расположения его основных конструктивных элементов, или конструктивная схема. Для классификации шпангоутов по конструктивным схемам необходимо выделить элементарные части, из которых может состоять гипотетический силовой шпангоут интегрального фюзеляжа. В результате анализа стало ясно, что шпангоут состоит из балочных и мотогондольных частей, которые в свою очередь могут быть двух видов: в виде кольца и в виде арочной балки.

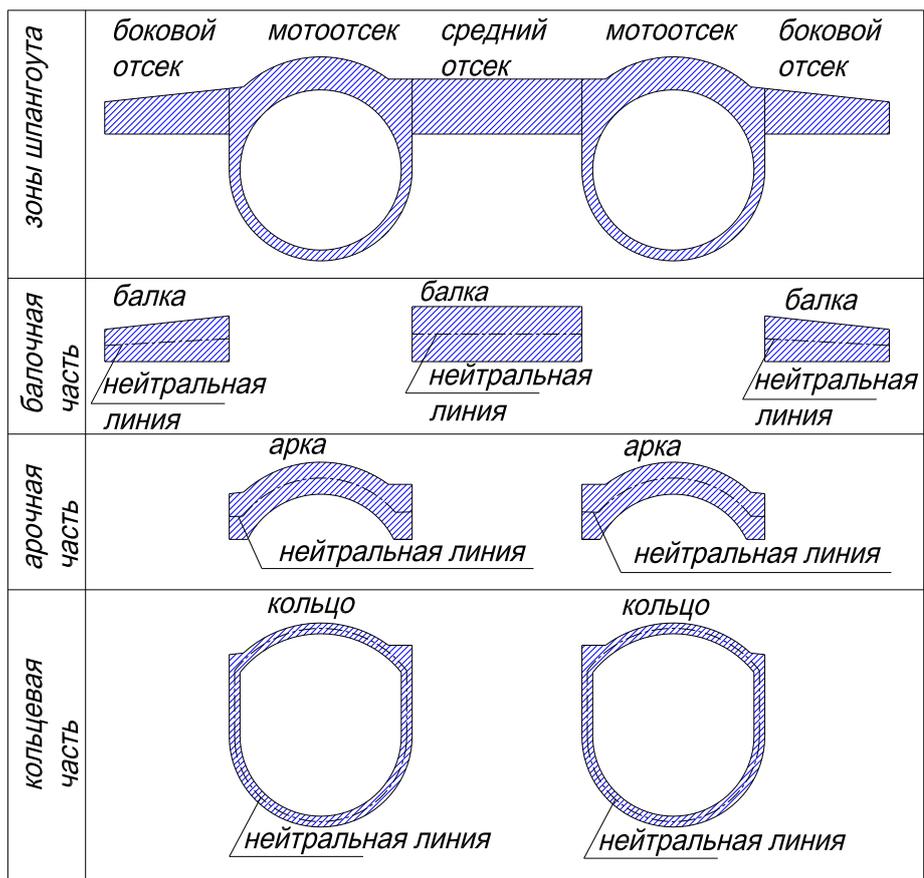


Рис. 9 Конструктивные части силового шпангоута.

Для анализа выделим две принципиальные схемы силовых шпангоутов: схема 1 – мотогондольная часть шпангоута представляет собой кольцо; схема 2 – мотогондольная часть шпангоута представляет собой арку.

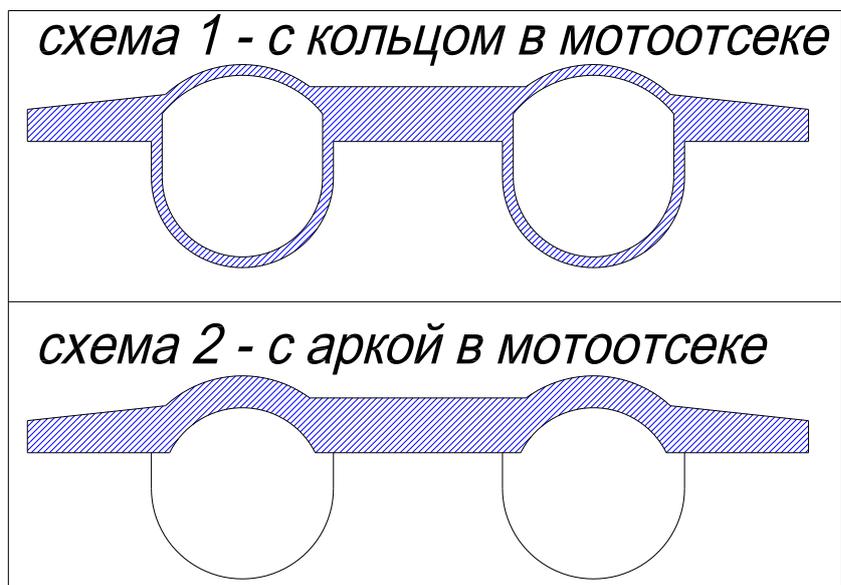


Рис. 10 Рассматриваемые конструктивные схемы силовых шпангоутов.

Классификация по конструктивной схеме шпангоутов позволяет сформулировать задачи статистического анализа схем, а именно: сравнить влияние и параметров формы на массовую эффективность каждой из исследуемых схем.

### **Классификация формы шпангоутов**

Кроме этого была проведена классификация формы силовых шпангоутов. Для этого были введены абсолютные и безразмерные параметры формы силовых шпангоутов. Так же было выяснено, что форма силового шпангоута определяется областью существования в которую конструкция должна быть вписана. Понятие области существования описывается поперечным сечением фюзеляжа в зоне установки шпангоута, а так же компоновкой и размещением агрегатов двигателя и воздухозаборника внутри сечения. Фактически, в качестве исходных данных конструктор оперирует параметрами формы именно области существования, пытаясь вписать в нее конструкцию шпангоута с наименьшей массой. Этот принцип и определяет рациональность технического решения схемы шпангоута.

Приведем эти параметры формы:

- $L, [\text{мм}]$  - Длина (ширина фюзеляжа) силового шпангоута
- $H_{\text{CP}}, [\text{мм}]$  - Средняя строительная высота
- $R, [\text{мм}]$  - Радиус круглого выреза
- $e, [\text{мм}]$  - Абсолютный эксцентриситет
- $S_{\text{ПР}}, [\text{мм}^2]$  - Площадь области существования шпангоута
- $\lambda = \frac{L}{H_{\text{CP}}}$  - Удлинение
- $\bar{e} = \frac{e}{R}$  - Относительный эксцентриситет

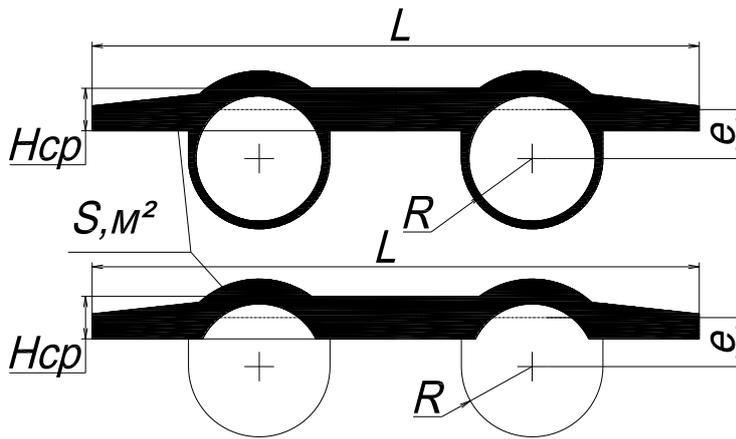


Рис. 11 Абсолютные параметры формы силовых шпангоутов.

Эти параметры формы характеризуют форму шпангоута интегрального фюзеляжа любой схемы. Поэтому была построена классификационная диаграмма по безразмерным параметрам удлинения и относительного эксцентриситета для существующих и перспективных самолетов.

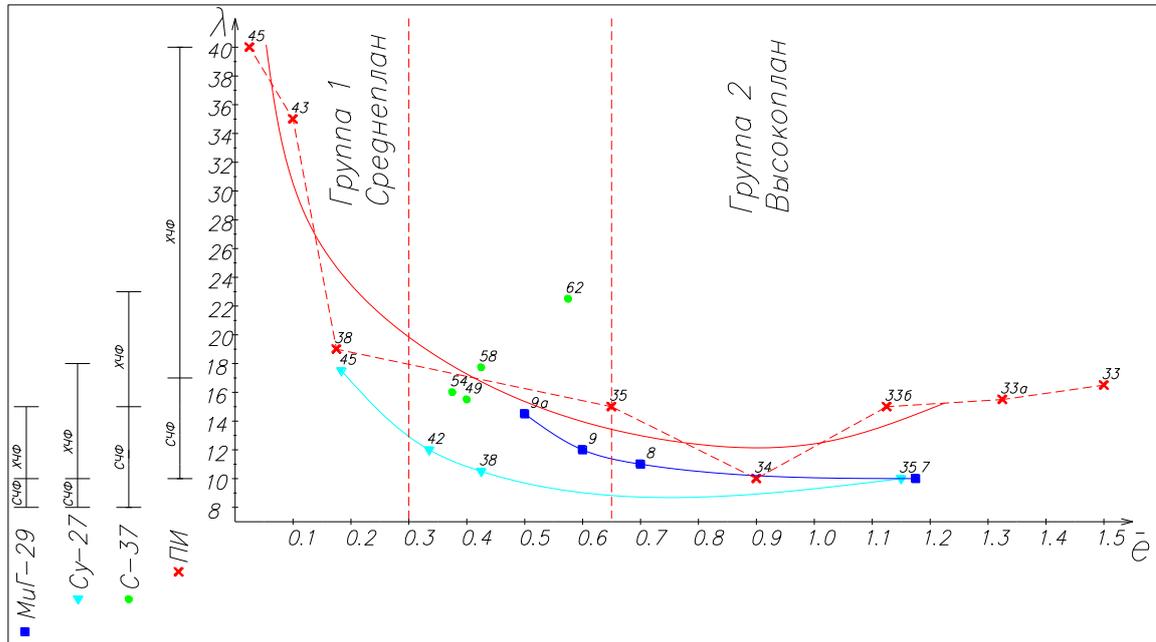


Рис. 12 Классификационные диаграммы шпангоутов истребителей интегральной компоновки.

В результате анализа этой классификационной диаграммы появилась возможность разбить все шпангоуты на три группы по параметру относительного эксцентриситета:

Группа 1 – среднеплан  $\bar{e} = (0,00 \div 0,30)$

Группа 2 – высокоплан  $\bar{e} = (0,65 \div 1,50)$

Группа 3 – зона неоднозначности  $\bar{e} = (0,30 \div 0,65)$

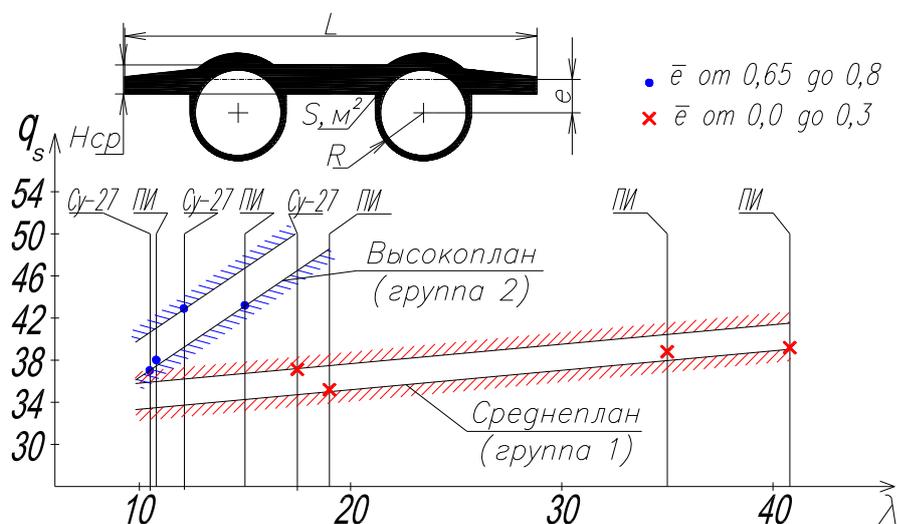
Это разбиение на группы позволило более системно подходить к дальнейшему анализу статистики шпангоутов на существующих истребителях.

### Статистический анализ

Для статистического анализа показателем весовой эффективности или совершенства был выбран параметр удельной массы. Само понятие удельной массы подразумевает соотношение массы к параметру размерности элемента. В данном случае параметром размерности был выбран параметр площади области существования. Именно в эту площадь конструктору необходимо вписать конструкцию шпангоута наименьшей массы. Тем и определяется массовая эффективность выбранной схемы. Приведем общий вид этого параметра и параметров, от которых он зависит.

$$q_s = \frac{m}{S_{\text{ПР}}} = f(\lambda, \bar{e}).$$

В результате анализа по этому параметру были построены статистически области на поле зависимости  $q_s = f(\lambda)$  для двух разных групп и двух разных схем силовых шпангоутов существующих истребителей.



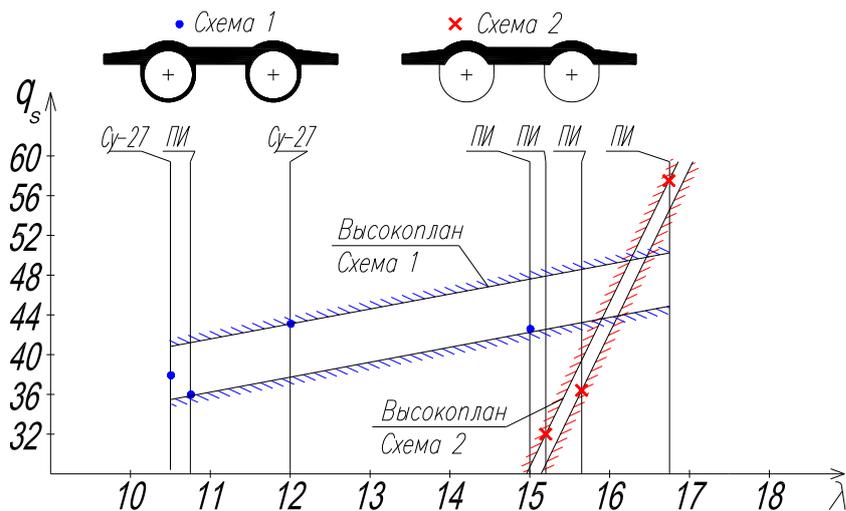


Рис. 13 Статистические зависимости удельной массы шпангоутов от параметров формы.

Эти зависимости могут дать общее представление о влиянии параметров формы и схемы на удельную массу шпангоута. Однако это еще не искомый инструмент, которым может пользоваться конструктор. Для более точного результата необходимо провести силовой анализ влияния параметров формы на распределение нагрузки в элементах силового шпангоута.

### Силовой анализ

В рамках силового анализа была поставлена задача определить влияние параметров формы на распределение нагрузки в элементах силового шпангоута. Основным элементом, определяющим конструктивную схему шпангоута является мотогондольная часть. Поэтому необходимо определить влияние относительного эксцентриситета и удлинения шпангоута на распределение нагрузки в кольцевой и арочной части шпангоута. Результатами этого анализа стали сравнительные диаграммы загрузки сводов кольца и диаграмма распределения нагрузки в арочной части. В обоих случаях приоритетной схемой заделки шпангоута была выбрана схема балки на четырех опорах. Влияние контуров отсеков учтено не было. Приведем полученные схемы и зависимости.

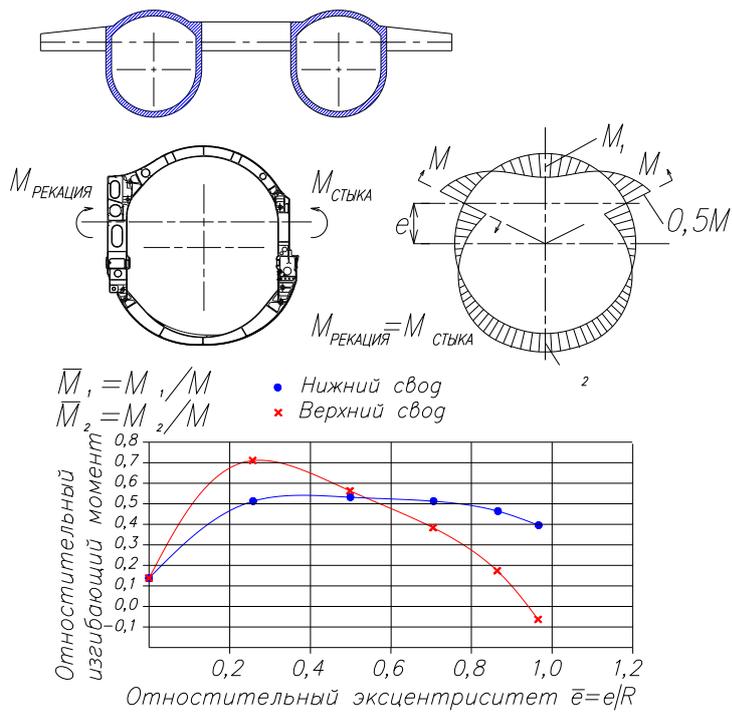


Рис. 14 Зависимость распределения нагрузки в кольце от параметра эксцентриситета.

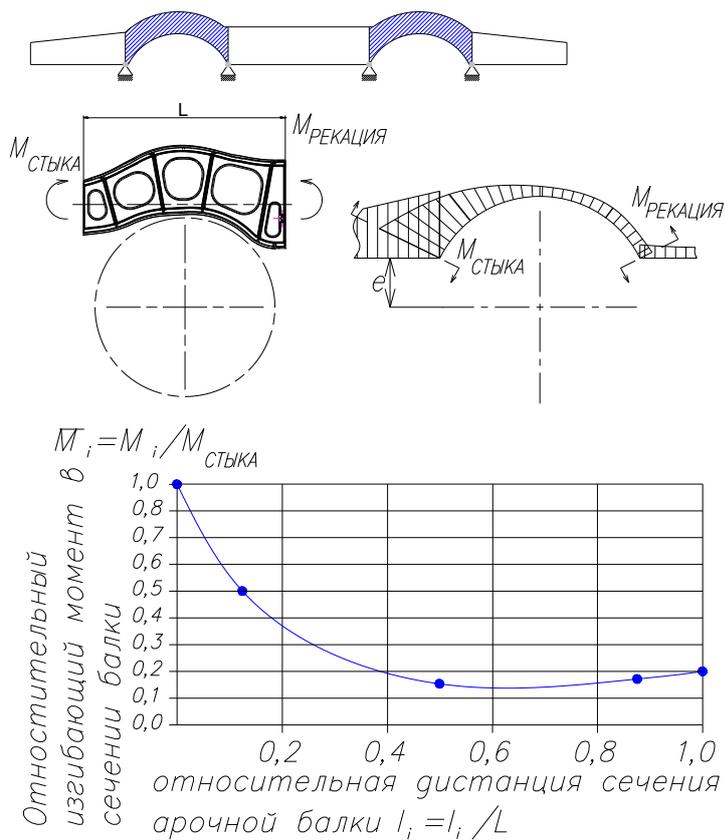


Рис. 15 Зависимость распределения нагрузки в арке силового шпангоута.

Кроме этих задач, возникает необходимость разрешить статическую неопределимость схемы заделки для балочной части шпангоута.

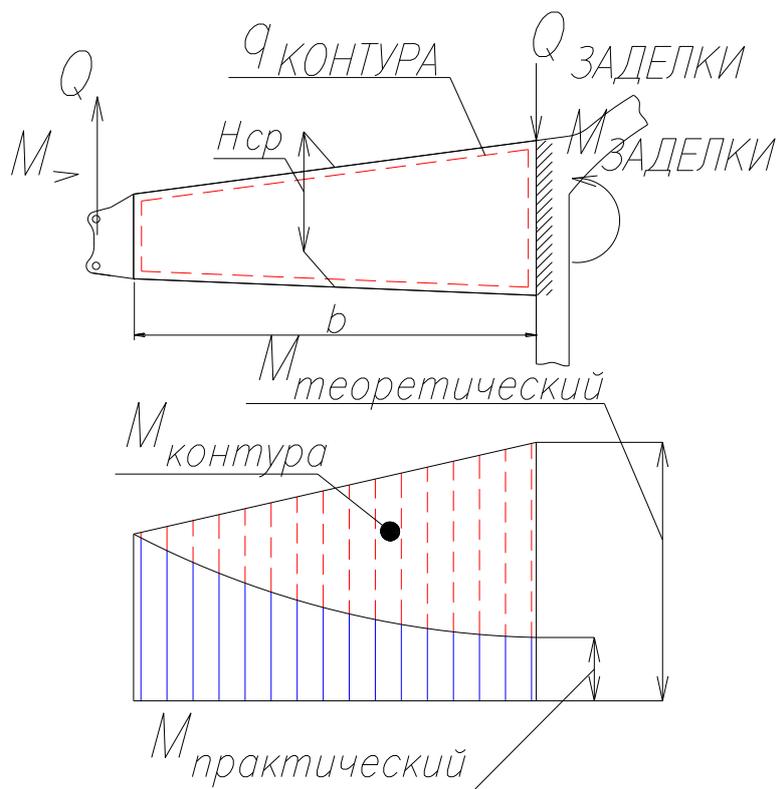


Рис. 16 Схема статически неопределимой заделки балочной части шпангоута.

Было выяснено, что соотношение долей изгибающего момента переходящего в кручение не зависит от площади контура, а зависит от удлинения балочной части. Эта зависимость и позволит разрешить статическую неопределимость на ранних этапах проектирования, когда известны только параметры формы. Приведем полученную зависимость.

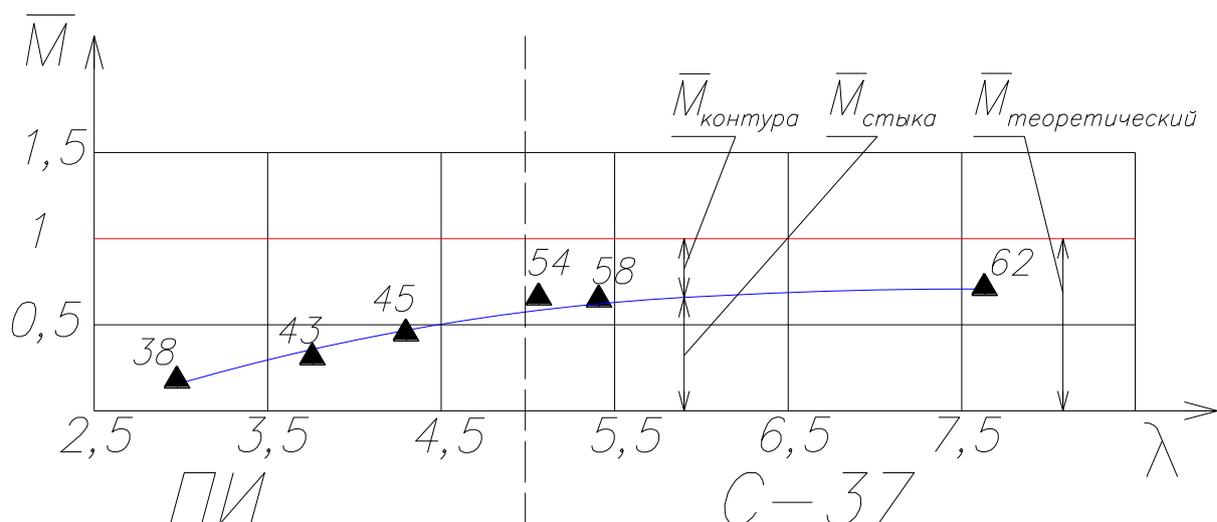


Рис. 17 Зависимость от параметров формы соотношения долей изгибающего момента в балочной части шпангоута.

### Разработка итоговых зависимостей

Для завершения исследования необходимо на базе полученных зависимостей распределения нагрузки, статистических зависимостей и введенной классификации построить семейство номограмм удельных масс на поле  $q_s = f(\lambda)$  для трех разных групп шпангоутов по относительному эксцентриситету и двух конструктивных схем. В результате твердотельного моделирования возможных вариантов формы шпангоутов разных схем была определена абсолютная масса идеализированных шпангоутов. В это понятие вкладывается тот основной факт, что в этих твердотельных моделях не учтены ребра жесткости, стыки и прочие конструктивные элементы, присущие реальным шпангоутам. Поэтому в целях большей достоверности эти результаты были подвергнуты сравнению со статистическими массами. После манипуляций, связанных с введением в полученные массы конструктивной «дельты», получили семейство кривых, или так называемых номограмм удельных масс, достоверность которых подтверждается статистическими данными. Приведем эти номограммы.

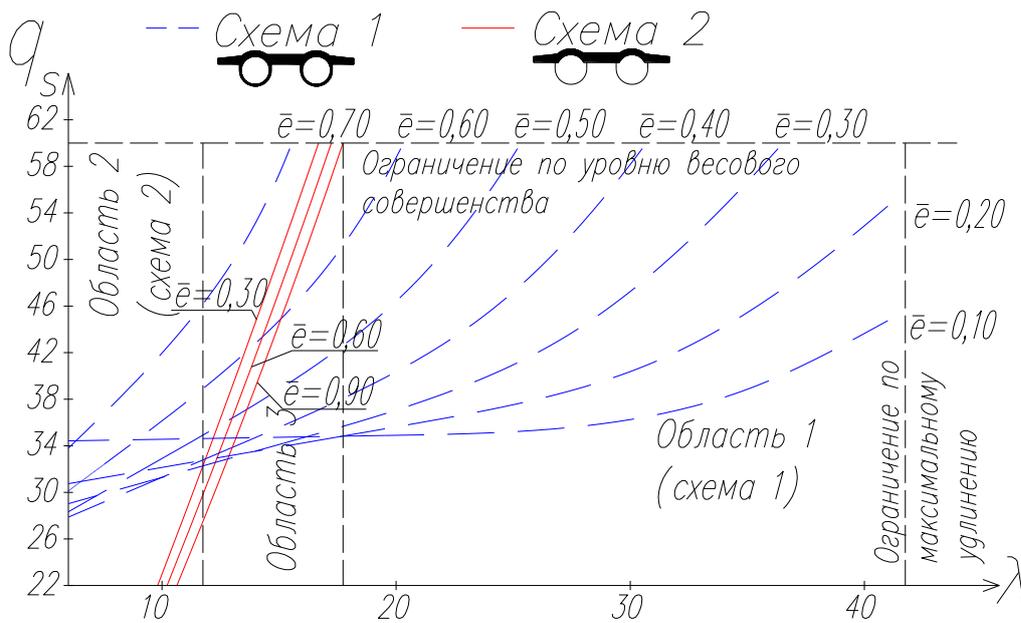


Рис. 18 Семейство сравнительных номограмм удельных масс для шпангоутов двух разных конструктивных схем.

Семейство номограмм удельных масс и является искомым инструментом сравнения и выбора рациональной схемы шпангоута при заданной форме области существования. Если проанализировать полученные номограммы, то станут очевидны три области. Эти области в достаточной степени однозначно определяют приоритетную рациональную конструктивную схему силового шпангоута. Нанесем эти области на классификационную матрицу форм силовых шпангоутов.

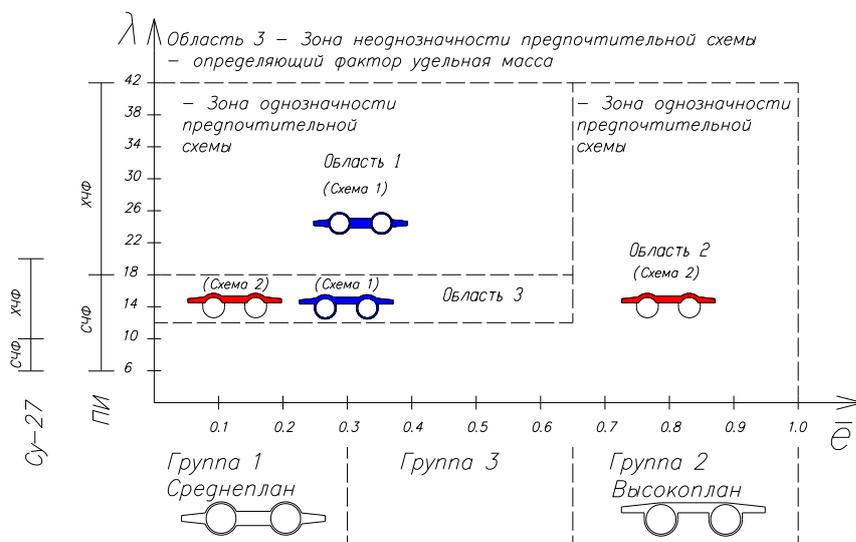


Рис. 19 Области однозначности рациональной схемы на классификационной матрице силовых шпангоутов.

Данный графический материал так же является инструментом выбора рациональной схемы. Применение полученных инструментов при проектировании образуют некую методику выбора рациональной схемы. Приведем алгоритм этой методики.

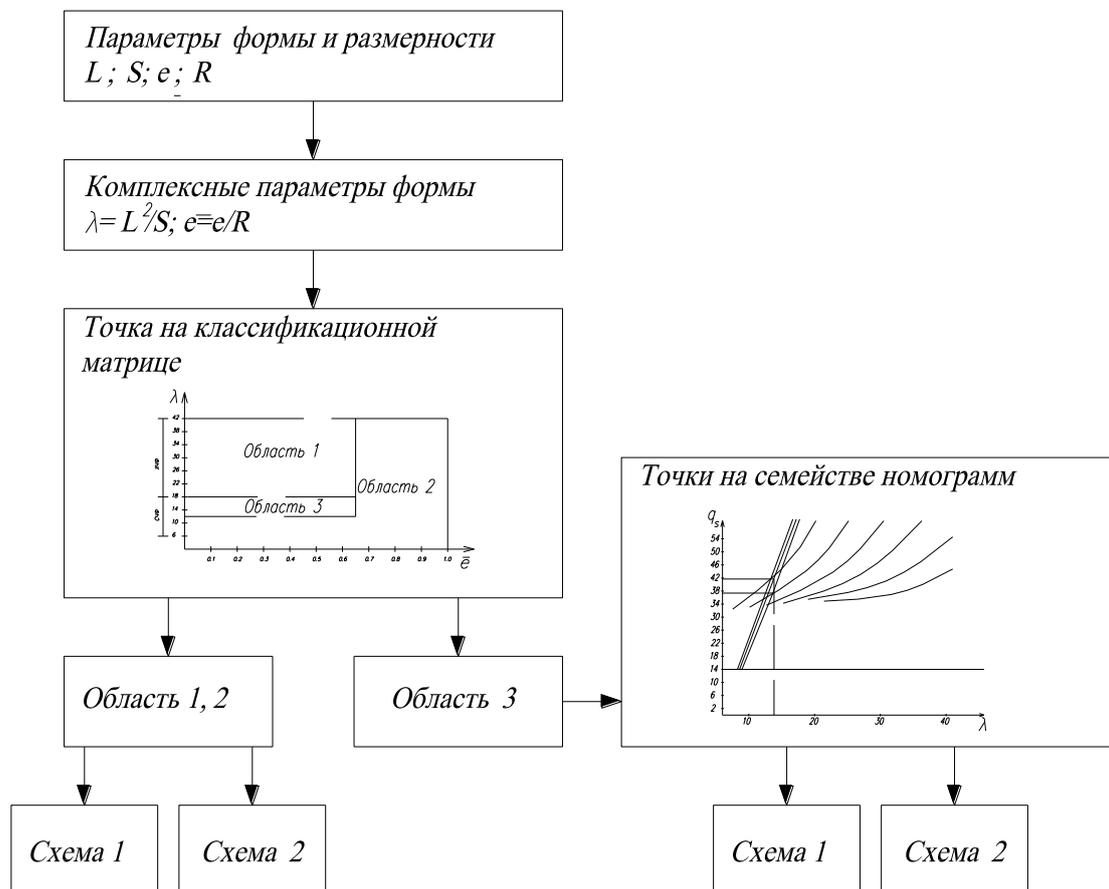


Рис. 20 Алгоритм применения классификационной матрицы и номограмм удельных масс при проектировании.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Использование номограмм и матриц заменяет несколько итераций проектировочного расчета на прочность и весовых расчетов;
- Достоверность инструментов выбора рациональной схемы шпангоутов подтверждается статистикой
- Раскрыта статическая неопределенность заделки силовых шпангоутов в фюзеляже и построены зависимости распределения нагрузки от изменения параметров формы

- Подход с использованием статистического анализа конструкции по удельной массе применим как для сравнения конструкций так и для формирования требований к перспективным конструкциям

### **Библиографический список**

1. Астахов М. Ф., Караваев А. В. И др. Справочная книга по расчету самолетов на прочность. М.: Оборонгиз, 1955. 710 с.
2. Бирюк В. И., Голован В. И., Скворцов Е. Б., Теплицын М. П. Конструктивно-силовые схемы для перспективных широкофюзеляжных самолетов интегральной компоновки. Сборник статей Труды ЦАГИ, М., 1997.
3. Бадягин А. А., Егер С. М., Мишин В. Ф., Склянский Ф. И., Фомин Н. А. Проектирование самолетов. Машиностроение, 1972.

### **Сведения об авторах**

Столяров Дмитрий Владимирович, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета). Ул. Летчика Бабушкина, д.33, корп. 3, к.101, Москва, 129281; тел. 8-925-746-53-34; e-mail: amidvoryalots@mail.ru

Попов Юрий Иванович, профессор Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-43-87