

Исследование безразмерного критерия оценки весовой эффективности конструкций силовых шпангоутов

Одинцова С.А.

*Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева, СГАУ, Московское шоссе 34, Самара, 443086,
Россия*

e-mail: sv-odincova@mail.ru

Аннотация

Рассматривается проблема оценки силовых схем шпангоутов на ранних стадиях проектирования. В качестве объективного критерия сравнения различных силовых схем предлагается безразмерный критерий весовой эффективности конструкций, нагруженных изгибающим моментом. Исследованы величины критерия для различных граничных условий, актуальных для практических задач. Установлена область геометрических параметров, для которых может быть найдена более выгодная конструкция, чем балка с постоянной строительной высотой. Приводится пример решения практической задачи по улучшению силовой схемы шпангоута маневренного самолета.

Ключевые слова: проектирование, силовой шпангоут, силовая схема, нагрузки, изгибающий момент, силовой фактор, безразмерный критерий силового фактора.

1 Введение

Усиленные шпангоуты представляют собой элементы поперечного силового набора фюзеляжа. Они устанавливаются в местах восприятия сосредоточенных усилий от крыла, оперения, двигателей, шасси с целью передачи и распределения нагрузки на обшивку. На начальных этапах проектирования для достижения требования минимальной массы стремятся к передаче усилий кратчайшим путем. При детальной проработке стремятся к отысканию конструкции, близкой к равнопрочной [1, 2, 3]. На сегодняшний день существует большое разнообразие конструкторско-технологических решений по силовым шпангоутам самолета.

Рациональность выбранной конструктивно-силовой схемы шпангоута существенно влияет на массу и эффективность всего самолета. При наличии большого разнообразия конструкторско-технологических решений определить, какой вариант силовой схемы является наилучшим, достаточно сложно [4, 5]. Поэтому существует потребность в разработке безразмерного критерия, который позволял бы сравнивать весовое совершенство различных силовых схем шпангоутов.

В настоящее время при поиске наилучшей силовой схемы конструкции широко используется подход, описанный в работе [6]. Суть данного метода в приложении к рассматриваемой задаче заключается в следующем:

1. В заданные геометрические ограничения вписывается непрерывная упругая среда, разбиваемая сеткой конечных элементов. В случае проектирования

шпангоута удобно использовать для этих целей плиту переменной толщины, которая включается в себя все возможные конструкции.

2. Назначается начальное распределение материала по элементам конструкции произвольно, но так, чтобы выполнялось условие:

$$\delta_{ri} > 0 \quad (1)$$

δ – толщина элемента, r – номер итерации, i – номер элемента.

3. Определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции с распределением материала δ_{ri} , и вычисляются эквивалентные потоки усилий в конструкции по четвертой теории прочности:

$$R_{ri} = \delta_{ri} (\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2})_{ri} = \delta_{ri} \sigma_{ri}^{экв} \quad (2)$$

4. Назначаются новые толщины:

$$\delta_{r+1,i} = \delta_{ri} \frac{\sigma_{ri}^{экв}}{[\sigma]} = \frac{R_{ri}}{[\sigma]} \quad (3)$$

$[\sigma]$ – допускаемые напряжения.

5. Новые толщины принимаются в качестве исходных, и расчет повторяется до тех пор, пока конструкция не будет удовлетворять условиям прочности.

Данный алгоритм приводит к конструкции переменной толщины с одинаковым уровнем эквивалентных напряжений во всех невырожденных элементах. Кроме того, такая конструкция имеет минимальную величину критерия – силовой фактор G , который вычисляется по следующему выражению и отражает одновременно величину и протяженность действия внутренних усилий [6]:

$$G = \int_V \sigma_{\max}^{\text{экв}} dV \cong \sum_{i=1}^n \sigma_i^{\text{экв}} V_i \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения, действующие в конструкции; i – номер элемента; V – объем материала конструкции; V_i – объем элемента.

В дальнейшем эту конструкцию будем называть теоретически оптимальной конструкцией (ТОК).

Через величину силового фактора можно определить потребный объем конструкции V_{\min} :

$$V_{\min} = \frac{G}{[\sigma]} \quad (5)$$

Масса теоретически оптимальной конструкции в таком случае определится по формуле:

$$m_{\text{ток}} = \rho \times \frac{G}{[\sigma]} \quad (6)$$

где ρ – плотность.

Массу реальной конструкции можно получить через $m_{\text{ток}}$:

$$m_{\kappa} = \varphi \cdot \rho \cdot \frac{G}{[\sigma]} \quad (7),$$

где φ – коэффициент полной массы, учитывающий технологические особенности, неравнопрочность элементов конструкции, массу дополнительных элементов и пр.; $\frac{[\sigma]}{\rho g}$ – удельная прочность, определяющая характеристики

материала; G – силовой фактор, характеризующий силовую схему конструкции.

Таким образом, масса конструкции линейно зависит от силового фактора.

Значение силового фактора, в свою очередь, зависит, в основном, от силовой схемы и слабо зависит от распределения жесткостей. Недостатком критерия «силовой фактор» для сравнения силовых схем на ранних стадиях проектирования является то обстоятельство, что этот критерий размерный, и поэтому не дает возможности сравнивать технические решения для самолетов с различными линейными размерами, нагрузками и силовыми схемами. Поэтому в работе [7] высказана идея оценки весовой эффективности конструкций с помощью безразмерного коэффициента силового фактора C_k , который определяется по формуле:

$$C_k = \frac{G}{P \cdot l} \quad (8),$$

где P – характерная нагрузка, l – характерный размер.

Выбор характерного размера и характерной нагрузки хорошо проработан для конструкций крыла. В этом случае в качестве характерной нагрузки используется подъемная сила крыла Y_a , а в качестве характерного размера – площадь крыла в степени $1/2$. С использованием этого критерия в работе [8] приведены значения коэффициента силового фактора для треугольных крыльев с различными силовыми схемами (рисунок 1).

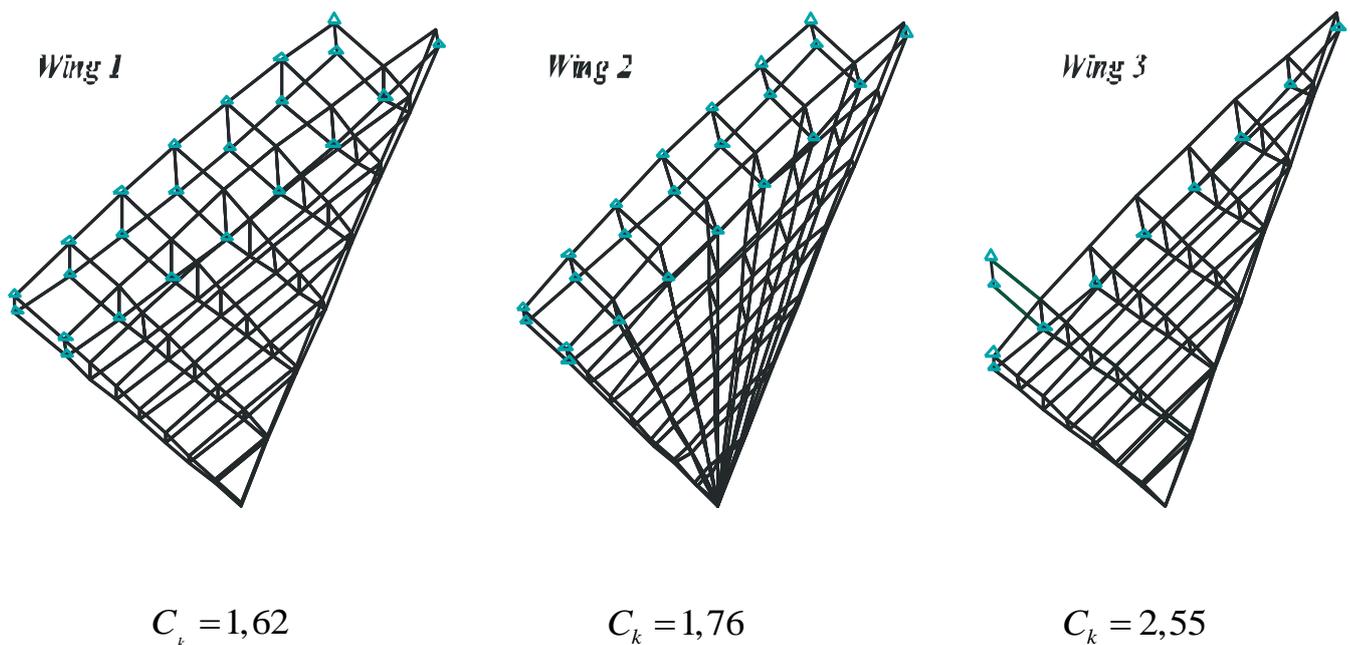


Рисунок 1 - Коэффициент силового фактора для различных силовых схем
треугольных крыльев

Преимуществом использования коэффициента силового фактора при оценке совершенства выбранных схем является то, что он зависит только от силовой схемы и вида нагружения, но не зависит от размеров и величины нагрузки. Важная особенность безразмерного критерия C_k состоит в том, что он позволяет поставить в соответствие каждой силовой схеме определенное число. Чем меньше значение этого коэффициента, тем выгоднее силовая схема.

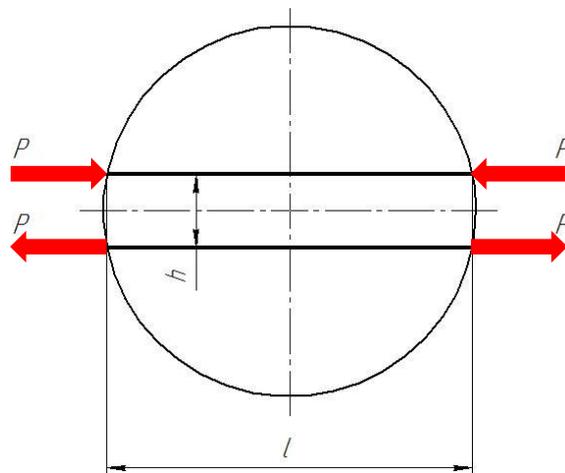
2 Безразмерный критерий для оценки силовых схем шпангоутов

Особенность силовых шпангоутов состоит в том, что для них основной нагрузкой является действие изгибающего момента. С учетом этого обстоятельства, в данной работе в качестве характерной нагрузки рассматривается пара сил $2P$, эквивалентная изгибающему моменту, а в качестве характерного размера –

расстояние l , на которое должен быть передан этот момент. В типовом случае нагружения фюзеляжа, показанном на рисунке 2, коэффициент силового фактора определяется по следующей формуле:

$$C_k = \frac{G}{2 \cdot P \cdot l} = \frac{G \cdot h}{2 \cdot M \cdot l}, \quad (9)$$

где G – силовой фактор [$H \cdot мм$], $2P = 2M / h$ – характерная нагрузка [H],



l – характерный размер [$мм$]. Коэффициент 2 учитывает пару сил.

Рисунок 2 – Нагружение шпангоута изгибающим моментом

Для конструкции шпангоута с параллельными поясами силовой фактор имеет следующее выражение:

$$G = 2 \cdot \left(\frac{M}{h} \cdot l \right) = 2 \cdot (P \cdot l) \quad (10)$$

Тогда,

$$C_k = \frac{G}{2 \cdot P \cdot l} = \frac{2 \cdot (P \cdot l)}{2 \cdot P \cdot l} = 1 \quad (11)$$

Значение коэффициента весовой эффективности, равное единице, соответствует простейшему техническому решению.

3 Исследование теоретически оптимальных структур шпангоутов

С целью исследования возможных значений C_k шпангоутов в данной работе рассмотрены величины коэффициента весовой эффективности для теоретически оптимальных конструкций (ТОК) при различных отношениях l/h .

Исследование проведено на квадратной области из конечных элементов типа «мембрана».

Данная область (50×50 КЭ) нагружается изгибающим моментом, приложенным в двух точках. При этом расстояние между усилиями в каждой последующей модели изменяется с шагом в 50 мм. Для сохранения значения изгибающего момента постоянным по величине значение исходной нагрузки $P = 1000000H$ для каждой модели делится на расстояние между усилиями h . Величина $l = 1270\text{мм}$ для всех моделей постоянна. Также в двух точках исследуемая область закреплена – в одной точке по оси X, в другой по оси X и Y.

Заданием точек приложения пары сил получены ТОК для соотношений l/h от 17 до 3. В этом интервале целесообразен поиск рациональной силовой схемы, отличающейся от традиционной схемы с параллельными поясами.

С помощью специальной подпрограммы, реализующей оптимизацию сечений в программе FEMAP, для каждой из моделей были определены картины распределения толщин. Характерные примеры приведены на рисунках 3 и 4.

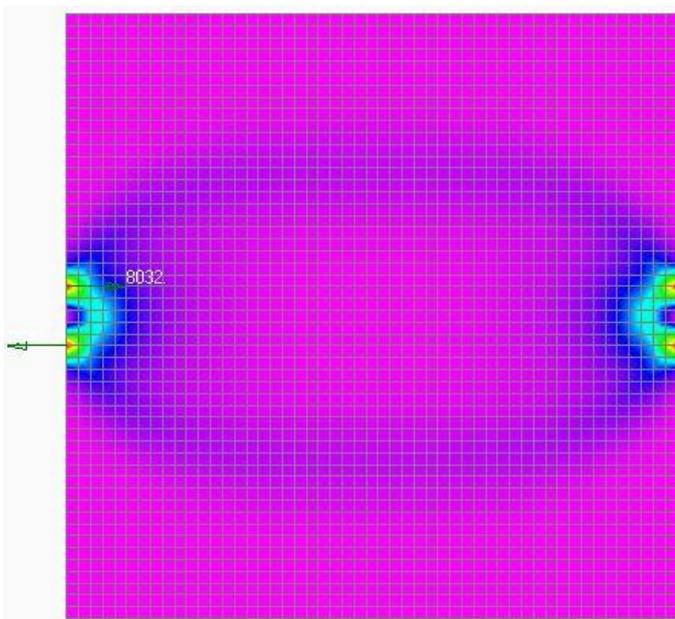


Рисунок 3 – Распределение толщин в

модели при $l/h = 10, C_k = 0,6$

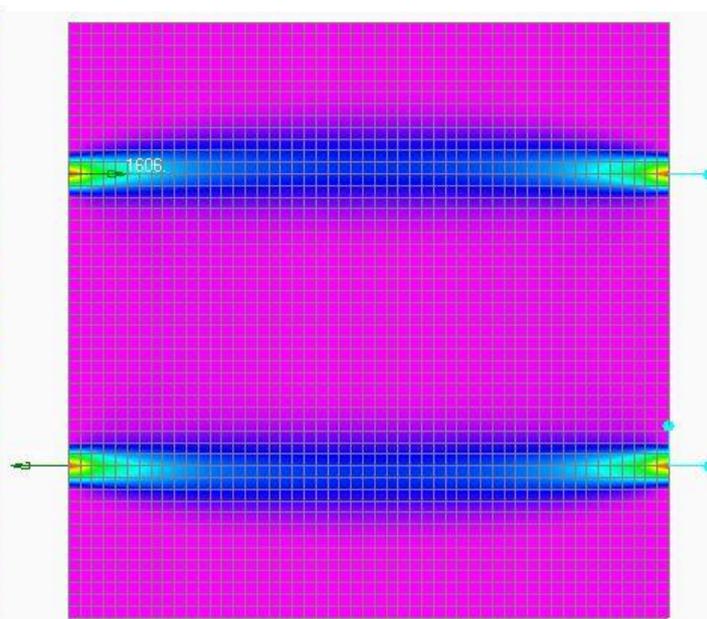


Рисунок 4 – Распределение толщин в

модели при $l/h = 2, C_k = 1,1$

При значении критерия $C_k < 1$ наблюдается достаточно сложная конфигурация силовой схемы, а при приближении C_k к единице силовая схема приближается к балке с параллельными поясами.

На рисунке 5 показаны значения силового фактора до и после оптимизации для различных l/h , на рисунке 6 – значения коэффициента силового фактора до и после оптимизации при изменении значений соотношения l/h .

Различия в найденных значениях коэффициента силового фактора составляет величину порядка 5%, что свидетельствует об относительно слабой зависимости коэффициента от распределения материала.

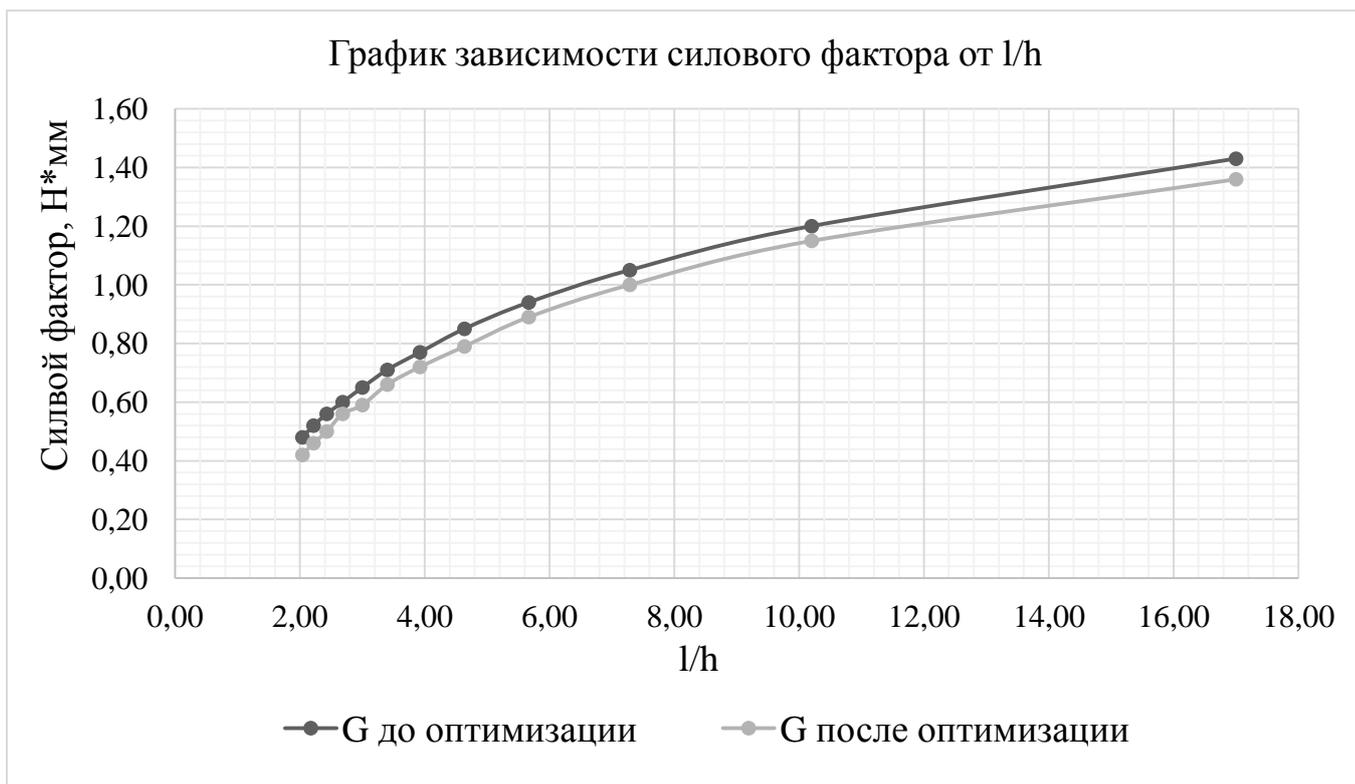


Рисунок 5 – Изменение силового фактора G при изменении значений l/h

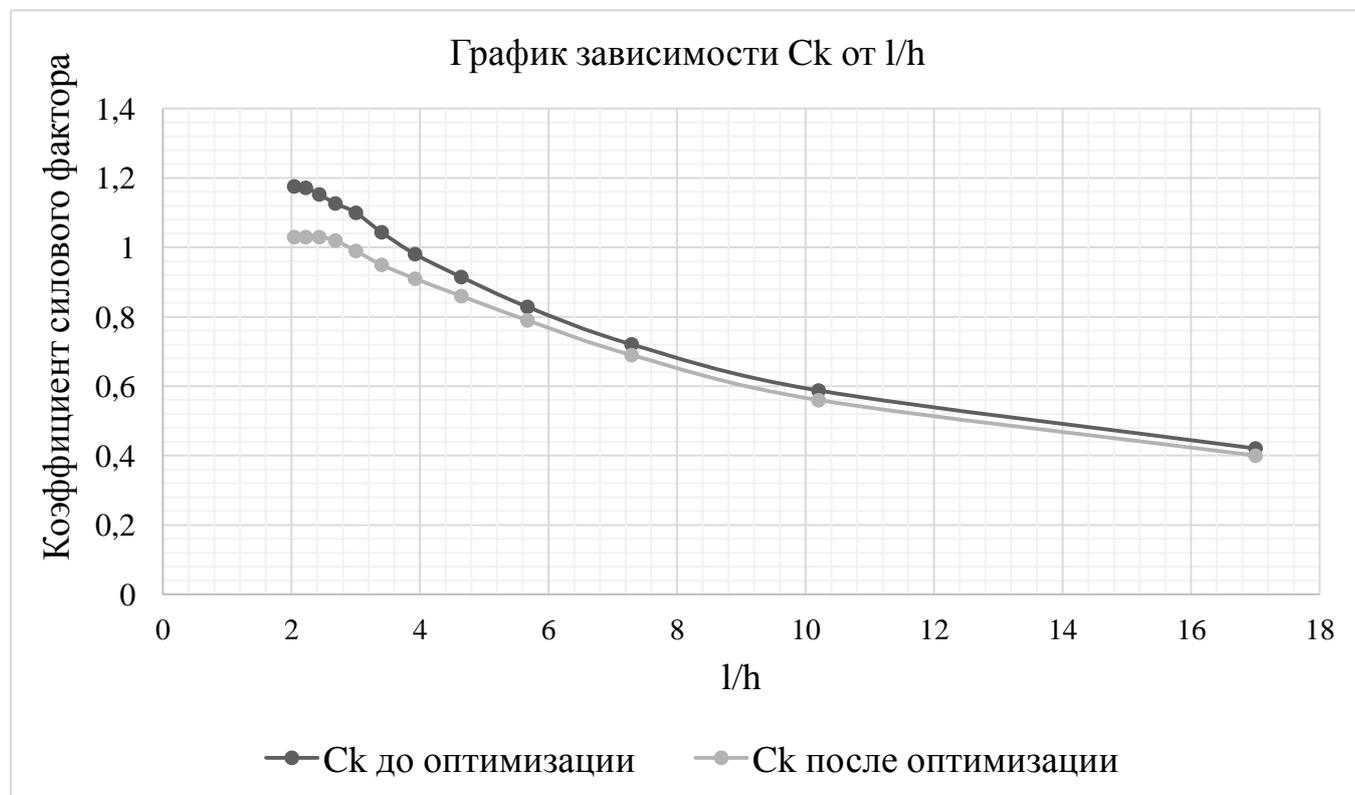


Рисунок 6 - Изменение значений C_k при изменении значений l/h

В полученных результатах представляет интерес то обстоятельство, что для ряда рассмотренных значений l/h в интервале от 17 до 4 значения коэффициента силового фактора C_k получились меньше единицы.

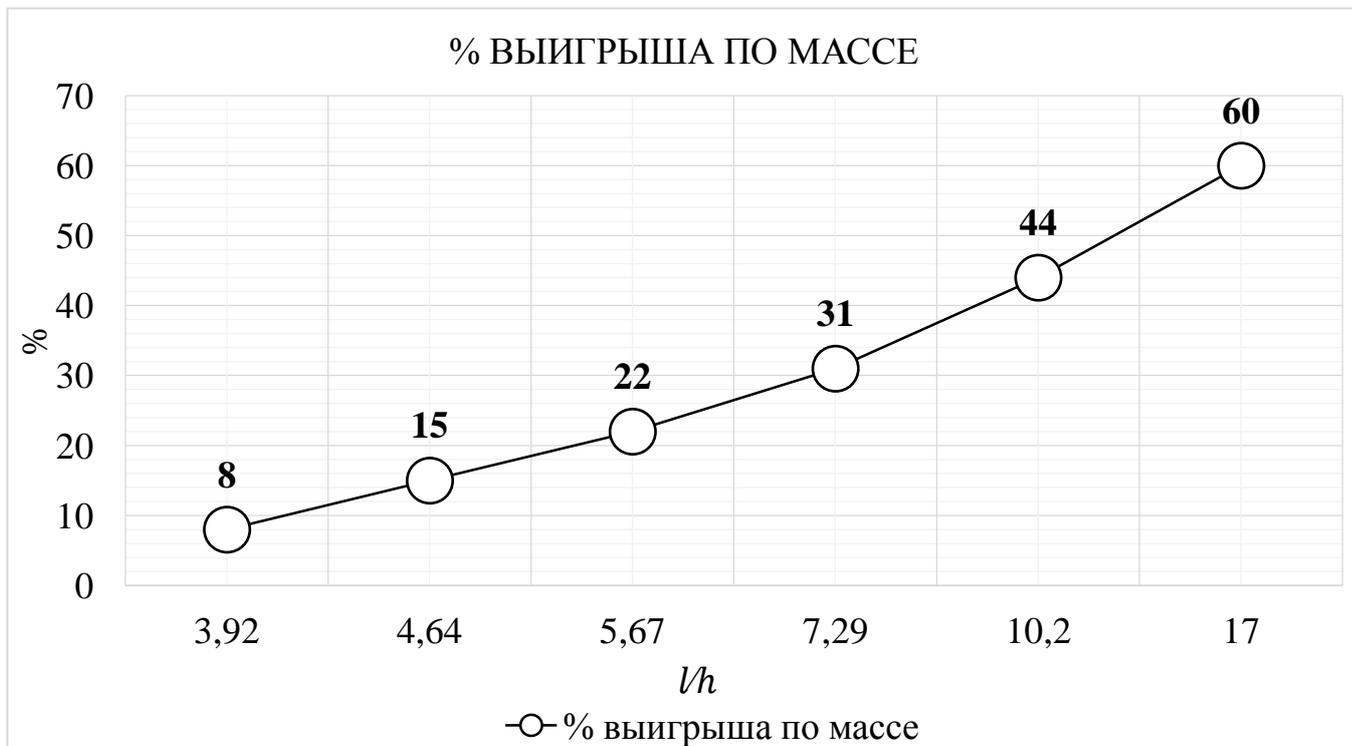


Рисунок 7 – Возможный выигрыш по массе

Это говорит о том, что для этих граничных условий возможно отыскание силовых схем шпангоутов, значительно более выгодных (рисунок 7), чем балка с параллельными поясами.

4 Практическая задача поиска оптимальной силового схемы шпангоута самолета Су-15

В данном разделе рассматривается использование коэффициента силового фактора при решении практической задачи о поиске оптимальной силовой схемы шпангоута самолета Су-15.

В качестве исходной конструкции рассматривался шпангоут самолета Су-15, представленный в лаборатории авиационных конструкций кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов СГАУ (рисунок 8).

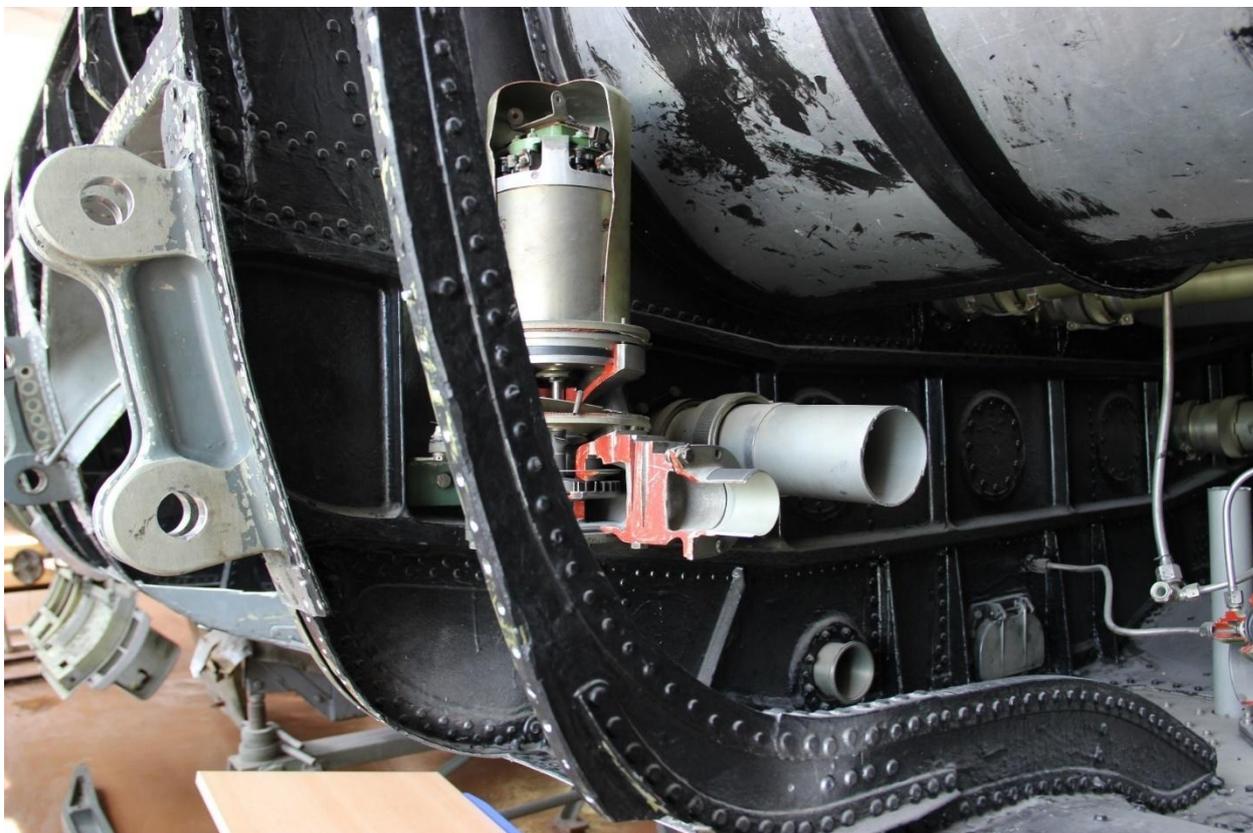


Рисунок 8 – Силовой шпангоут Су-15 в зоне стыка с крылом

При анализе существующей конструкции были рассмотрены две модели. Первая модель (рисунок 9) строилась в предположении, что тонкая зашивка стенки толщиной $\delta = 1\text{мм}$ работает без потери устойчивости. Для данной модели коэффициент силового фактора $C_k = 0,94$ получилось близким к единице. Полученное значение можно объяснить тем, что часть нагрузки берет на себя стенка шпангоута, что сомнительно, т.к. в ней возникают большие напряжения.

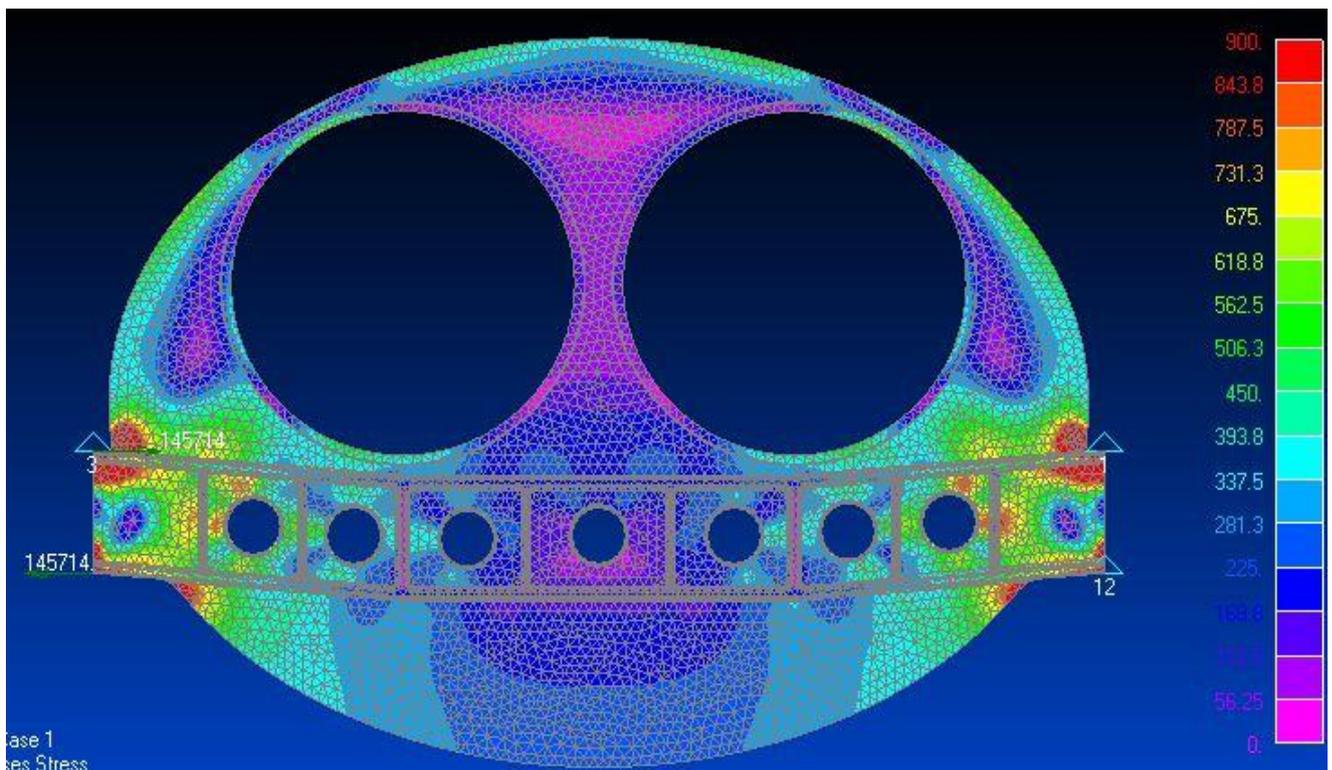


Рисунок 9 – Эквивалентные напряжения в КЭМ с тонкой зашивкой

Вторая модель более реальная (рисунок 10), в ней не учитывалась силовая работа мембранных элементов вне балки. При этом коэффициент силового фактора такой модели составил $C_k = 1,03$.

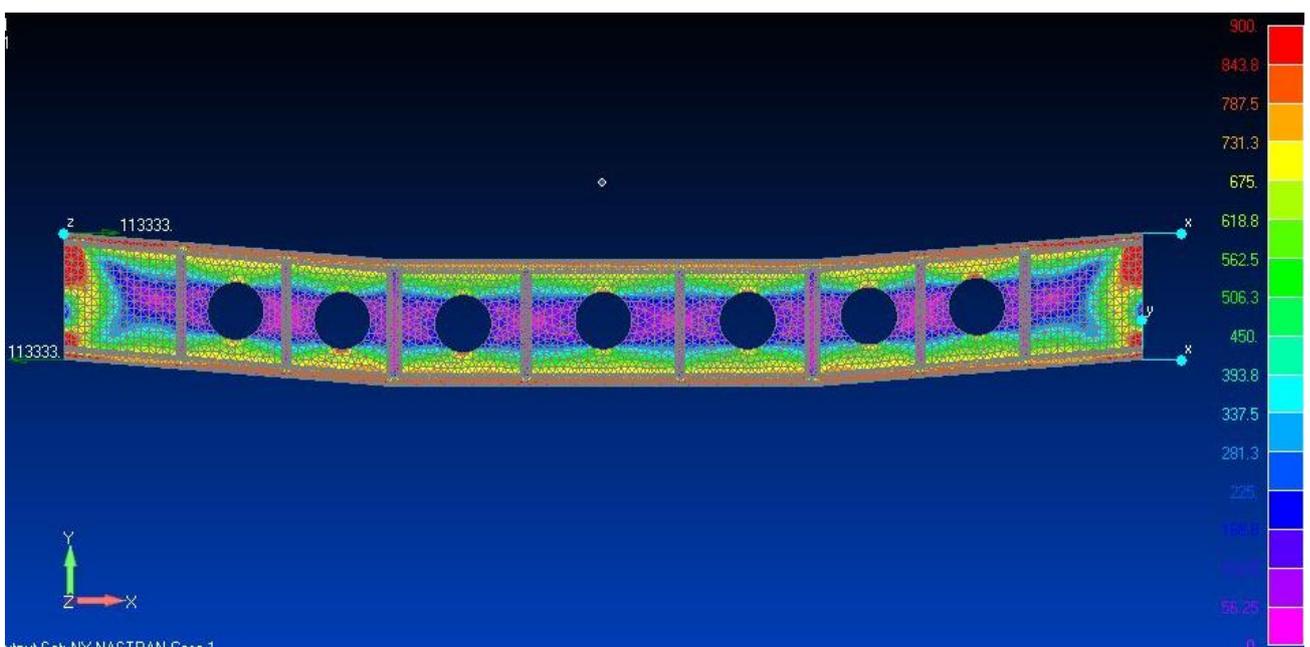


Рисунок 10 – Распределение эквивалентных напряжений

в КЭМ без тонкой зашивки

Теоретически оптимальная конструкция представляет собой пластину переменной толщины (рисунок 11). Коэффициент весовой эффективности ТОК составил $C_{k\text{ТОК}} = 0,78$.

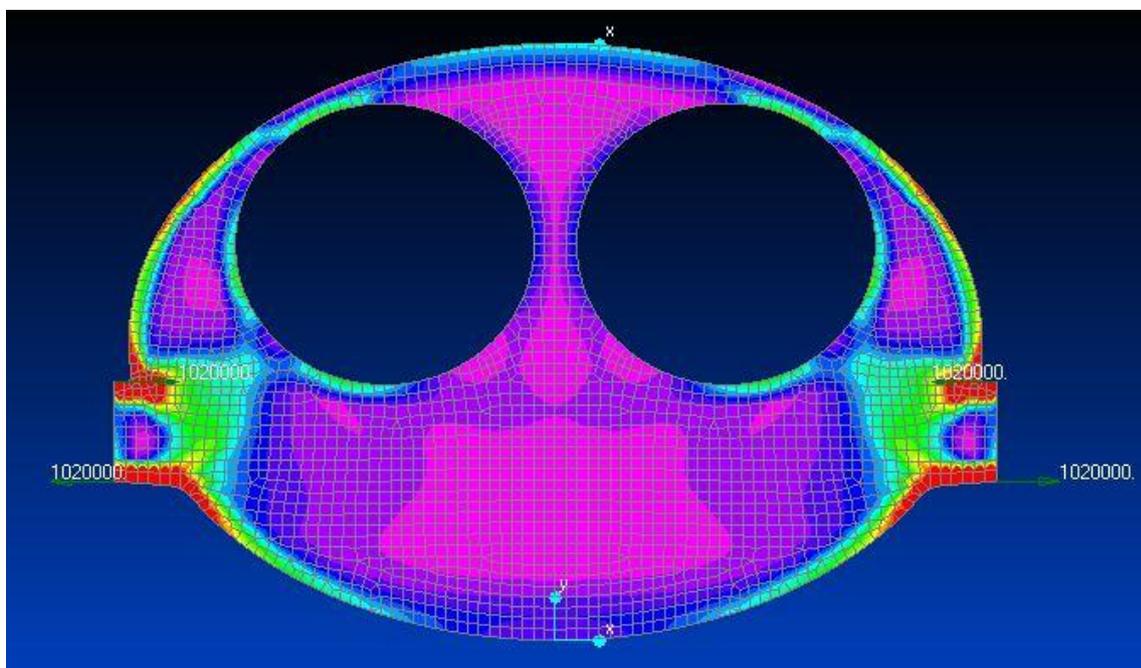


Рисунок 11 – Распределение толщин в ТОК

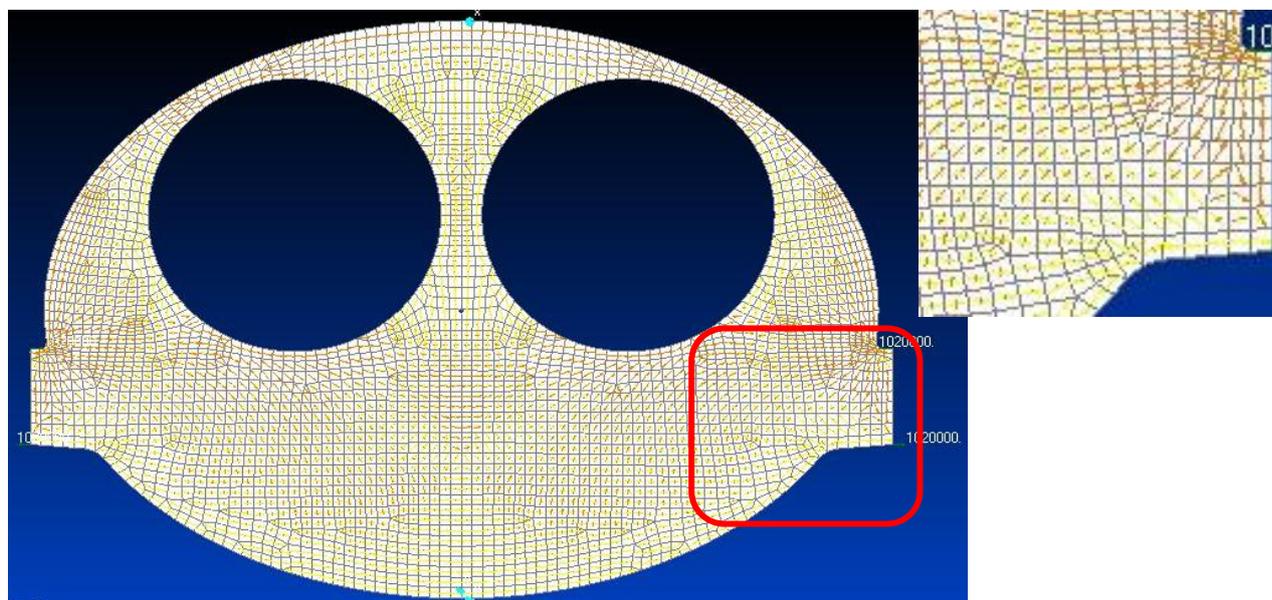


Рисунок 12 – Поток главных усилий в ТОК

Анализ картины распределения толщин (рисунок 11) и потоков главных усилий (ПГУ) (рисунок 12) позволяет разработать несколько рациональных силовых схем.

В первой схеме №1 (рисунок 13) в силовой работе принимает участие зашивка стенки. Для нее значение коэффициента силового фактора C_k составило 0,83. Эта величина близка к коэффициенту ТОК и меньше C_k существующей конструкции на 11%.

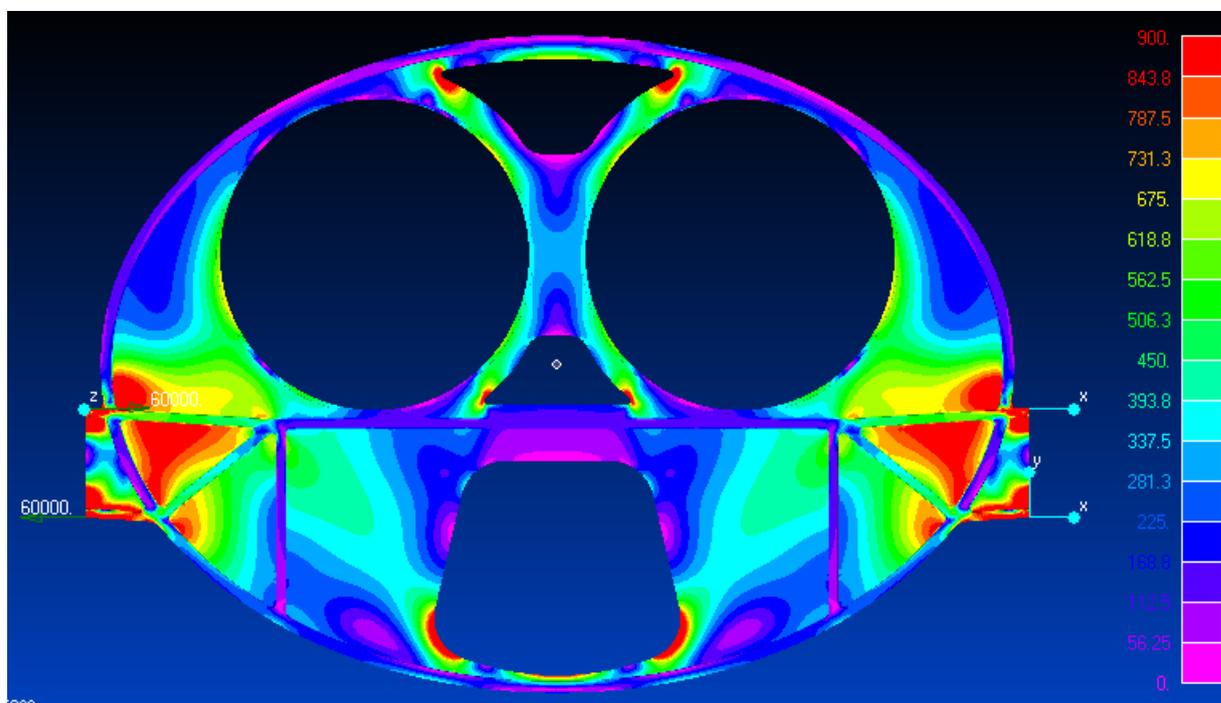


Рисунок 13 – Распределение эквивалентных напряжений модели №1

Коэффициент весовой эффективности схемы №2 (рисунок 14), представляющей собой ферменную конструкцию, составляет 0,96. Эта величина получилась меньше значения коэффициента силового фактора существующей модели без учета работы мембранных элементов, но в тоже время эта величина больше C_k теоретически оптимальной конструкции и C_k схемы №1.

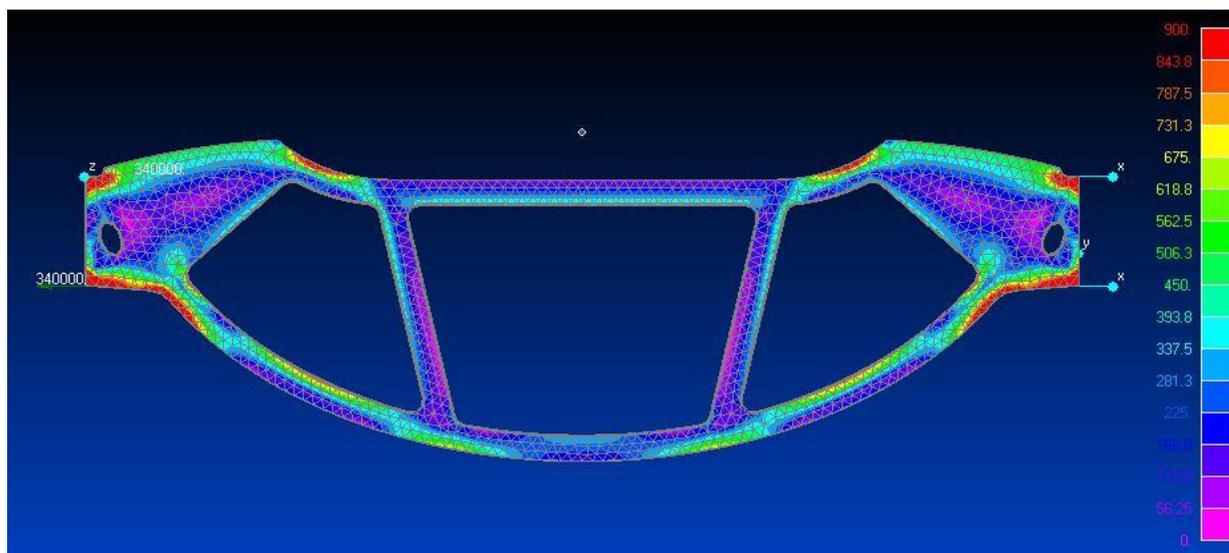


Рисунок 14 – Распределение эквивалентных напряжений модели №2

Выводы

1. Выбор в качестве характерной нагрузки для вычисления коэффициента силового фактора пары сил, эквивалентной действующему изгибающему моменту, а в качестве характерного размера - плечо передачи момента, позволяет построить безразмерный критерий для оценки весовой эффективности изгибаемой конструкции с величиной равной единице для простейшего технического решения в виде балки с параллельными поясами.

2. Рассмотренный безразмерный критерий силового совершенства шпангоутов позволяет поставить в соответствие той или иной силовой схеме число, определяющее весовое совершенство конструкции с выбранной силовой схемой. Это позволяет накапливать информацию по различным техническим решениям силовых шпангоутов, независимо от линейных размеров самолетов и уровней перегрузок.

3. Численным исследованием определена область отношений l/h , в которой возможны технические решения с коэффициентом силового фактора меньше единицы.

4. Рассмотрена практическая задача оптимизации силового шпангоута маневренного самолета с характерным поперечным сечением для размещения двух двигателей, в которой показаны возможность снижения массы шпангоута на величине порядка 10%.

Для типовой проектной задачи шпангоута маневренного самолета с двумя двигателями показана возможность снижения массы шпангоута на величину порядка 10%.

Благодарность

Автор благодарит профессора Комарова В.А. за выбор темы и консультации и ассистента Кишова Е.А. за помощь в написании специальной программы

Библиографический список

1. Шульженко М. Н. Конструкция самолетов. - М.: Машиностроение, 1971. - 416 с.

2. Ендогур А. И. Проектирование авиационных конструкций. - М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. - 540 с.

3. Niu, Michael C.Y. Airframe structural design [Text]/Michael C. Y. Niu Hong Kong : CONMILIT PRESS LTD., 1988. - 612 p.

4. Попов Ю.И., Столяров Д.В. Расчетно-статистическая методика сравнительного анализа конструкции фюзеляжа истребителей интегральной

компоновки // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 1. С.10-17.

5. Попов Ю.И., Столяров Д.В. Выбор рациональной схемы силовых шпангоутов фюзеляжа истребителя интегральной компоновки // Электронный журнал «Труды МАИ», 2011, выпуск, №43: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24858> (дата публикации 30.03.2011)

6. Комаров, В. А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники.– М.: Машиностроение, 1984.– С. 114-129.

7. Комаров В. А. Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". 2000, №1. С. 31-39.

8. Комаров В. А., Гуменюк А.В. Прогнозирование и контроль массы авиационных конструкций с использованием критерия силовой фактор // Общероссийский научно-технический журнал "Полет" 2003. №6. С. 24-30.