

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ БАЛОЧНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ЧАСТЕЙ СИЛОВОГО ШПАНГОУТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ И МАССУ

ПОПОВ Юрий Иванович — Московский авиационный институт (государственный технический университет), профессор, к.т.н.
Тел.: 8-903-103-72-14; e-mail: design101@mai.ru

Yuri I. POPOV — Moscow Aviation Institute (State Technical University), professor, candidate of science
Phone: 8-903-103-72-14; e-mail: design101@mai.ru

СТОЛЯРОВ Дмитрий Владимирович — Московский авиационный институт (государственный технический университет), аспирант
Тел.: 8-905-746-5334; e-mail: amidvoryalots@mail.ru

Dmitriy V. STOLJAROV — Moscow Aviation Institute (State Technical University), postgraduate
Phone: 8-905-746-5334; e-mail: amidvoryalots@mail.ru

В статье рассматриваются методы силового и параметрического анализа совершенства конструкции поперечного силового набора каркаса хвостовой части фюзеляжа истребителя интегральной компоновки. В качестве объекта анализа выбран полноразмерный силовой шпангоут с кольцом в зоне мотоотсека двухдвигательного самолета с разнесенными двигателями.

Herein strength and parametric analysis methods aimed for quality definition for fuselage tail section lateral axis based structures are considered relative to integral scheme fighter. Full-scale power rib is subject to analysis with ring located around engine pod section of twin engine airplane with spread engines.

Ключевые слова: конструкция, шпангоут, нагрузка, эксцентриситет, удлинение, масса, параметр.

Key words: design, rib, load, eccentricity, extension, mass, operation factor.

Введение

Интегральный фюзеляж, в отличие от традиционного фюзеляжа круглого сечения, делится на отсеки, как в поперечном, так и в продольном направлении. Традиционный фюзеляж делился на отсеки в поперечном направлении стеночными шпангоутами. Эти шпангоуты старались совместить с узлами навески различных агрегатов планера, чтобы максимально их использовать в силовой схеме. Интегральный фюзеляж плоский, а не круглый, и приближен к профилю крыла. От расположения агрегатов силового установочного и грузовых отсеков в таком фюзеляже зависит разбиение его на продольные отсеки. Конструктивными элементами, ограничивающими продольные отсеки, являются продольные стенки.

Существенно меняется схема самого силового шпангоута. В традиционном фюзеляже роль опоры силового шпангоута выполнял контур обшивки или обшивка бортовых панелей фюзеляжа, в зависимости от вида сосредоточенной нагрузки на

шпангоут. В интегральном фюзеляже схема силового шпангоута напоминает многоопорную балку. Причем опорами шпангоуту служат вышеупомянутые стенки.

Важную роль в выборе схемы шпангоута играет взаиморасположение балочной части шпангоута относительно мотогондольной. Как правило, в мотогондольной части таких шпангоутов компоновкой предусмотрен круглый вырез под двигатель или канал воздухозаборника. Расстояние между нейтральной осью изгиба балочной части шпангоута и осью компоновочного круглого выреза под двигатель будем называть эксцентриситетом. Большой эксцентриситет приводит к тому, что вся силовая часть шпангоута практически «пропущена» над исключенным компоновкой объемом. Шпангоут в таком случае представляет собой балку со «слабыми» арками в нижней части, либо вообще без арок.

Анализ особенностей силовой схемы силового шпангоута с кольцом

Рассмотрим полноразмерный шпангоут хвостовой части фюзеляжа с круглой рамой (кольцом) (рис. 1).

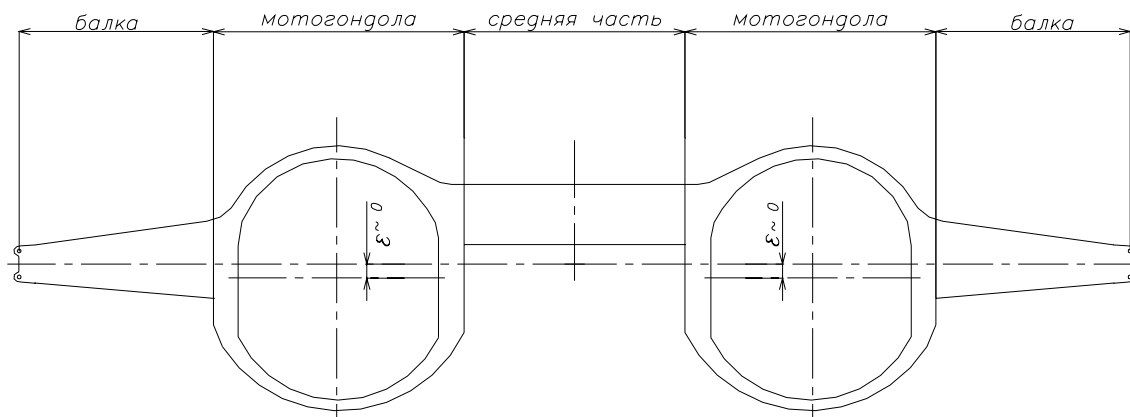


Рис. 1. Общий вид силового шпангоута с круглой рамой (кольцом)

Малый эксцентриситет ϵ или вообще его отсутствие приводит к тому, что часть шпангоута в зоне данного отсека превращается в раму или уже в знакомое по традиционным шпангоутам кольцо. Приведем качественную эпюру изгибающих моментов в кольце силового шпангоута (рис. 2).

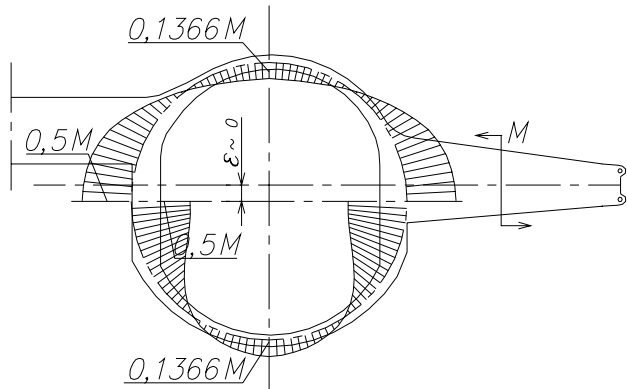


Рис. 2. Характерная эпюра изгибающих моментов в кольце рамного шпангоута

Следует отнести к достоинству шпангоутов рамной схемы тот факт, что при одинаковой нагрузке на шпангоуты величина изгибающего момента в «кольцевой» части рамного шпангоута составляет не более 50% от изгибающего момента в арке балочного шпангоута. А потребная площадь сечения поясов арок кольцевой части в несколько раз меньше, чем потребная площадь сечения поясов арки балочного шпангоута. Это видно из эпюры, так как максимальный момент в арках шпангоута составляет 10%.

Также необходимо заметить, что пиковые значения изгибающего момента в зоне стыка ($0,5M$)

кольцевой части рамного шпангоута с балочной его частью «срезаются» в зависимости от строительной высоты этой балочной части (рис. 3). Полезно на начальной стадии проектирования таких шпангоутов пользоваться формулой для определения зна-

чения максимального момента в кольце шпангоута:

$$M_{\max} = 0,5 \times M \times \left(1 - \frac{H_{\text{стыка}}}{0,86 \times D} \right),$$

где $H_{\text{стыка}}$ — строительная высота балочной части шпангоута в зоне стыка с кольцевой частью; D — диаметр нейтральной линии кольца шпангоута; M — изгибающий момент балочной части шпангоута в зоне стыка с кольцевой частью.

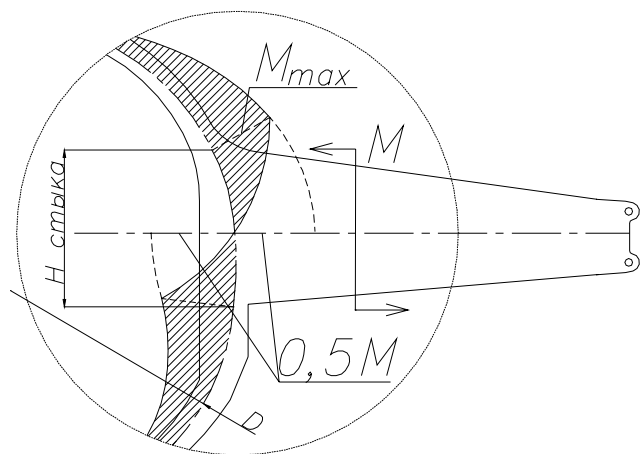


Рис. 3. Модификация эпюры изгибающих моментов в зоне стыка кольца с балочной частью

Определение главного параметра формы, влияющего на распределение нагрузки в кольце

Форма силовых шпангоутов с кольцом в мотогондольной части во многом определяет максимальную нагрузку, а следовательно, и массу шпан-

шпангоута. Необходимо выделить главные параметры этих шпангоутов, которые бы в значительной мере характеризовали форму шпангоута. Форма шпангоута, а именно взаиморасположение балочной и кольцевой части, характеризуется эксцентриситетом между нейтральной линией балочной части и осью круглого выреза (рис. 4).

противоположными по направлению. Разгрузку кольца шпангоута контуром фюзеляжа учитывать не будем, так как это вносит статическую неопределенность, обусловленную жесткостью контура.

Для начала приложим в местах сопряжения кольца с балочными частями шпангоута сосредото-

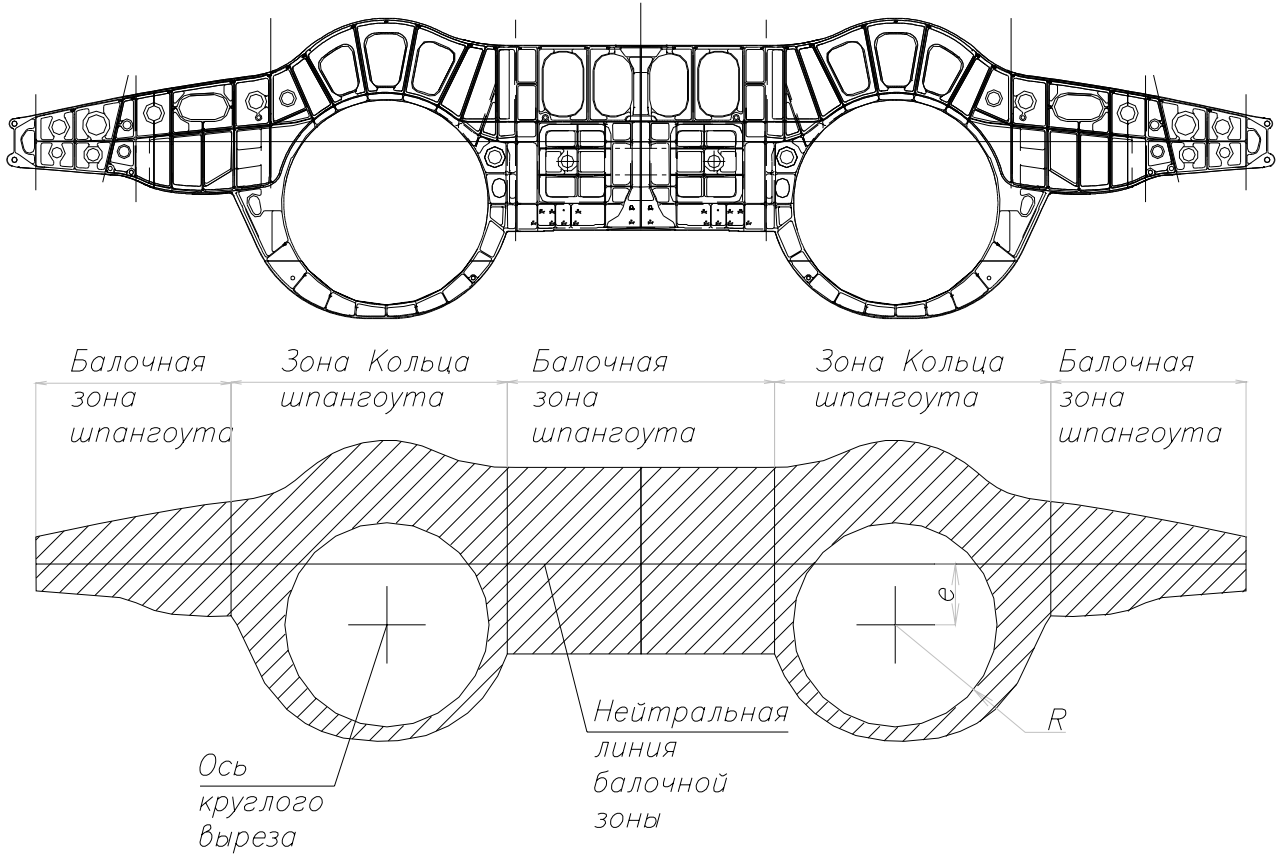


Рис. 4. Конструкция и расположение круглого выреза в шпангоуте с кольцом

Рассмотрим кольцо шпангоута изолированно от балочных частей. Для соответствия схемы нагрузки такого кольца заменим балочные части сосредоточенными нагрузками, равными по величине и

противоположными по направлению. Эпюра изгибающих моментов тогда будет иметь следующий вид (рис. 5).

Важную роль в распределении нагрузки в кольце играет расположение зоны сопряжения кольца

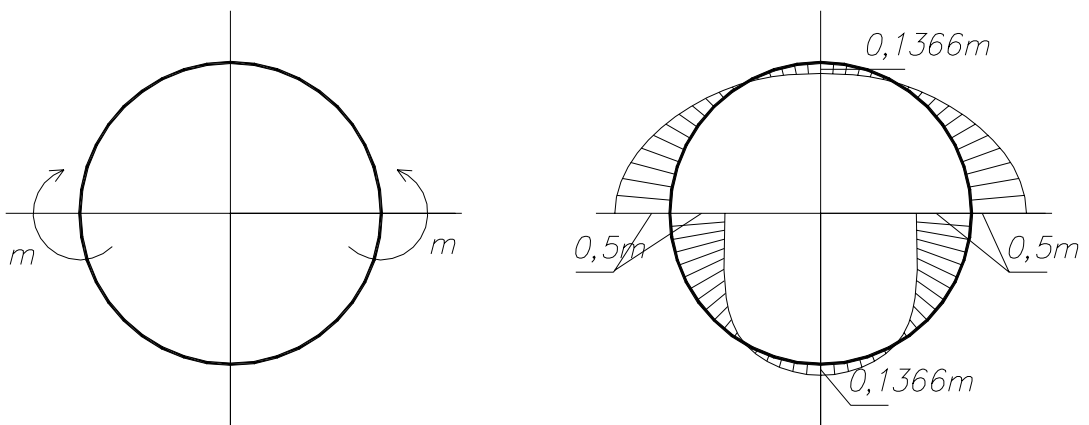


Рис. 5. Характерная эпюра изгибающих моментов в кольце рамного шпангоута от сосредоточенного изгибающего момента

с балочной частью шпангоута. В данном примере показано распределение изгибающего момента в кольце, зоны сопряжения которого с балочной частью находятся посередине кольца с двух сторон. Очевидно, что изгибающий момент распределяется между верхним и нижним сводом кольца поровну и составляет $0,1366m$. Однако при смещении нейтральной оси балочной части шпангоута относительно центра кольца к верхнему своду соотношение загрузки верхнего и нижнего свода меняется (рис. 6).

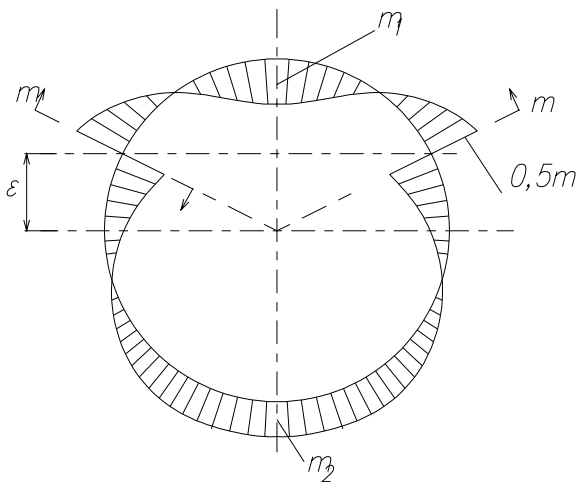


Рис. 6. Изменение эпюры изгибающих моментов в зависимости от смещения балочной части

Таким образом, можно отметить важность ключевого геометрического параметра шпангоута с круглой рамой — эксцентриситета. Для установления характера влияния эксцентриситета на соотношение загрузки воспользуемся следующими зависимостями [1]:

$$m_1 = m \times (0,3183 \times (2 \sin \theta \cos \alpha_1 + \theta) - 1);$$

$$m_2 = m \times (0,3183 \times (2 \sin \theta \cos \alpha_2 + \theta)),$$

где α — угол, соответствующий зоне кольца, в которой определяется момент; θ — угол, обусловленный эксцентриситетом.

Благодаря этим зависимостям можно построить сравнительные диаграммы загрузки верхнего и нижнего сводов кольца. Примем, что балочная часть приближена к верхнему своду кольца. Геометрия кольца в случае с таким эксцентриситетом показана на рис. 7.

Для простоты будем определять значение изгибающего момента в двух точках кольца:

точка 1 соответствует значению угла $\alpha_1 = 0^\circ$ в формуле

$$m_1 = m \times (0,3183 \times (2 \sin \theta \cos \alpha_1 + \theta) - 1);$$

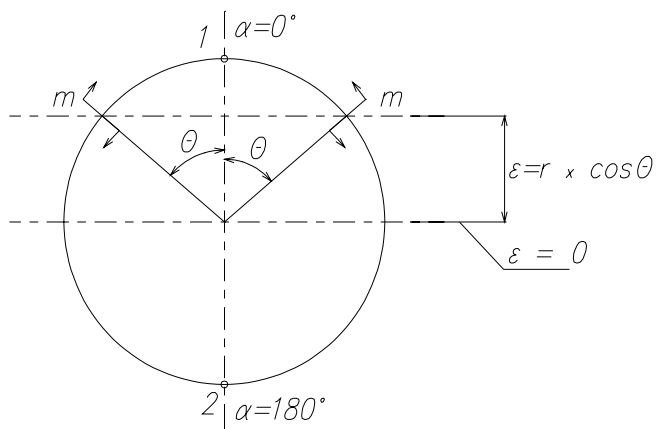


Рис. 7. Параметры нагрузки и геометрии в кольце шпангоута со смещением балочной части

точка 2 соответствует $\alpha_2 = 180^\circ$ в формуле

$$m_2 = m \times (0,3183 \times (2 \sin \theta \cos \alpha_2 + \theta)).$$

Сам параметр эксцентриситета связан с углом θ формулой $e = r \times \cos \theta$, $\bar{e} = \cos \theta$. Соответственно, принимая значения угла θ равными $75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ и 15° , определим значения максимального изгибающего момента в верхнем и нижнем своде кольца. Принятые дискретные значения угла θ соответствуют значениям эксцентриситета $0,258r, 0,5r, 0,707r, 0,866r$ и $0,9659r$ соответственно, если подставить значения угла в формулу $e = r \times \cos \theta$.

Произведя расчет по формулам, занесем результаты в табл. 1.

Теперь имеем все данные для построения сравнительных диаграмм загрузки верхнего и нижнего сводов (рис. 8).

Из построенных диаграмм видно, что по мере увеличения эксцентриситета увеличивается разница в загрузке верхнего и нижнего сводов. Характер диаграмм нелинейный. До значений эксцентриситета примерно в четверть радиуса наблюдается существенный рост загрузки обоих сводов. К значению эксцентриситета в полрадиуса загрузка сводов снова уравнивается. Далее с увеличением эксцентриситета загрузка верхнего свода падает практически до нуля, а загрузка нижнего свода остается на высоком уровне.

Рассмотрим случай нагружения кольца шпангоута от радиальной нагрузки, приложенной в зоне

Таблица 1

$\epsilon=e/R$	0	0,2588	0,5	0,7071	0,866	0,9659
m_1	0,1366	0,713	0,56615	0,3817	0,166577	-0,07026
m_2	0,1366	0,5167	0,53644	0,61857	0,47	0,399764

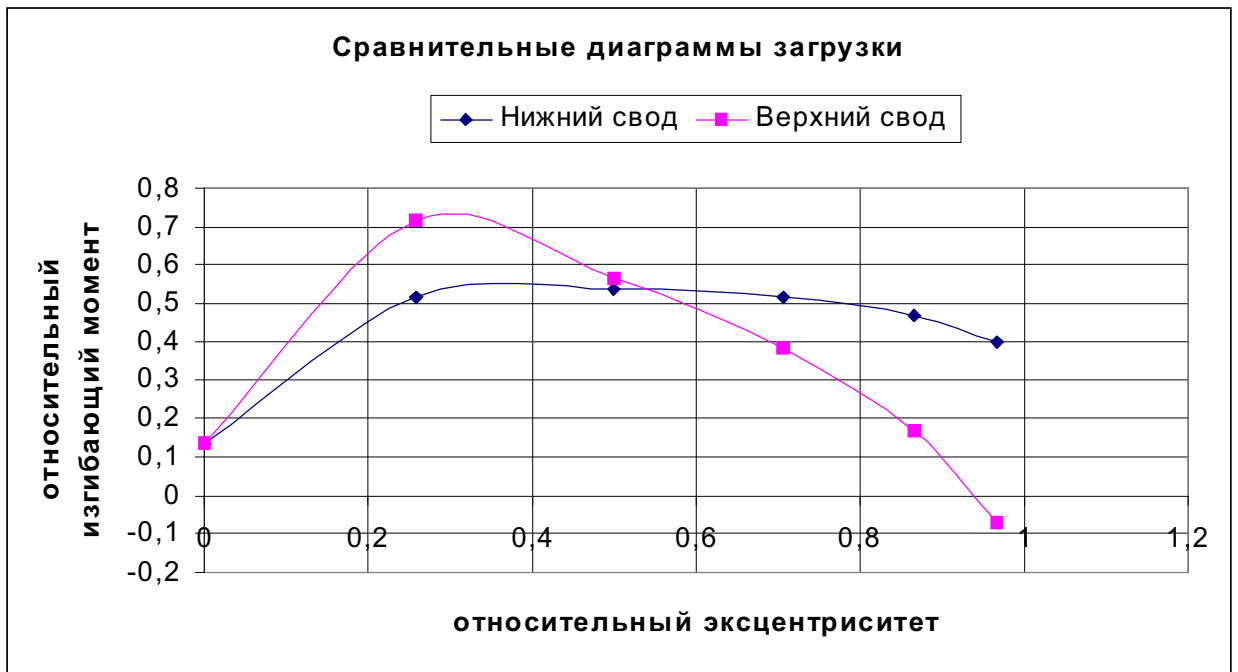


Рис. 8. Диаграммы загрузки изгибающим моментом сводов кольца шпангоута в зависимости от эксцентриситета смещения балочной части от сосредоточенного момента

перехода балочной части в кольцо. Будем прикладывать сосредоточенное усилие P . Эпюра изгибающих моментов в долях от момента $P \times r$ будет иметь следующий вид (рис. 9).

Вид эпюры изгибающих моментов характерен для среднерасположенной балочной части относительно кольца. Этот случай взаиморасположения балочной части и кольца соответствует эксцентриситету, равному нулю. При смещении балочной части относительно оси кольца вверх распределение нагрузки между верхним и нижним сводами будет меняться (рис. 10).

Выбираем, как и в предыдущем случае, две точки на сводах кольца, где и будем определять момент в зависимости от величины эксцентриситета. Точка 1 соответствуют значению угла $\alpha_1 = 0$ в формуле

$$m_1 = P \times r \times (0,3183 \times (\sin \theta - \theta \times \cos \theta + \theta \times \cos \alpha_1 - \sin \theta \times \cos \theta \times \cos \alpha_1) - \cos \alpha_1 + \cos \theta);$$

точка 2 соответствует $\alpha_2 = 180^\circ$ в формуле

$$m_2 = P \times r \times (0,3183 \times (\sin \theta - \theta \times \cos \theta + \theta \times \cos \alpha_2 - \sin \theta \times \cos \theta \times \cos \alpha_2)).$$

Параметр эксцентриситета связан с углом θ формулой $e = r \times \cos \theta$, и относительный $\bar{e} = \cos \theta$. Соответственно, принимая угол θ равным $75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ и 15° , определим значения максимального изгибающего момента в верхнем и нижнем своде

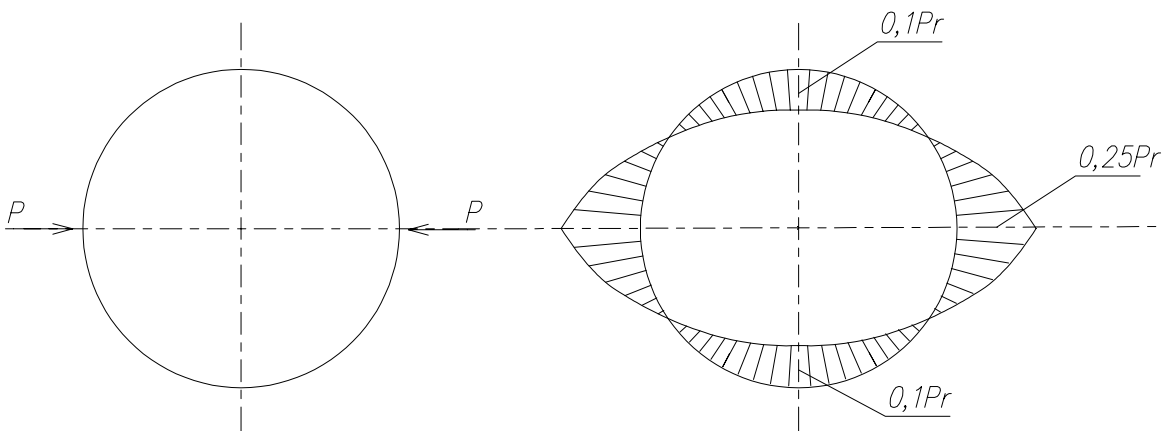


Рис. 9. Характерная эпюра изгибающих моментов в кольце рамного шпангоута от радиального усилия

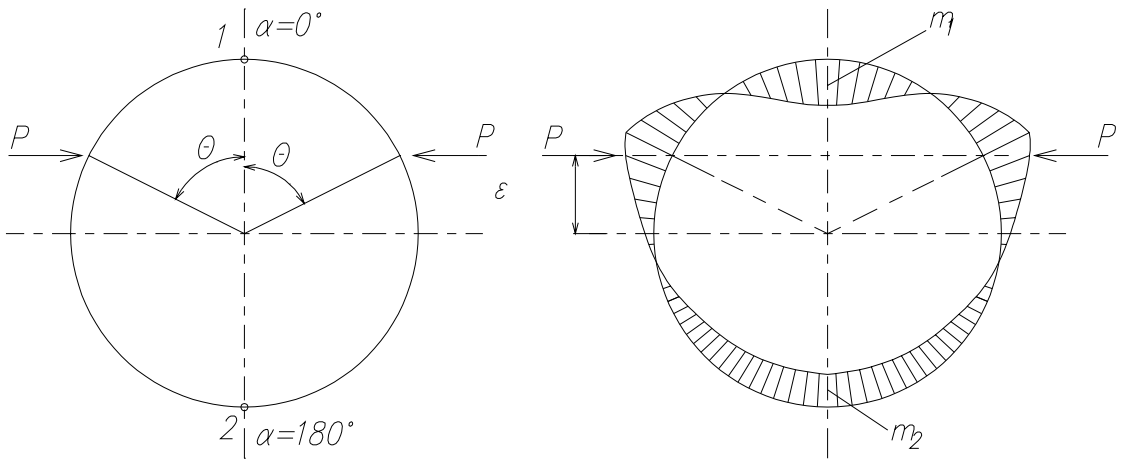


Рис. 10. Изменение эпюры изгибающих моментов в кольце рамного шпангоута из-за смещения балочной части

кольца. Принятые дискретные значения угла θ соответствуют значениям эксцентриситета $0,258r$, $0,5r$, $0,707r$, $0,866r$ и $0,9659r$ соответственно, если подставить значения угла в формулу.

Произведя расчет по формулам, занесем результаты в табл. 2.

Таблица 2

$\varepsilon=e/R$	0	0,259353	0,500383	0,707341	0,866136	0,965954
m_1	0,1	0,204503	0,195466	0,15368	0,090267	0,028406
m_2	0,1	0,137356	0,086417	0,042494	0,014	0,001863

Теперь имеем все данные для построения сравнительных диаграмм загрузки верхнего и нижнего сводов (рис. 11).

Таким образом, можно сделать вывод, что для рационального равномерного использования кольца шпангоута эксцентриситет не должен превышать величины $0,707r$. В противном случае изгибающий момент, приходящий с балочной части шпангоута, начинает загружать более протяженную зону конструкции, в то время как свод, находящийся напротив балочной части, практически не нагружен.

Параметрический анализ статистики конструкций шпангоутов

Изменение соотношения загрузки верхнего и нижнего сводов кольца из-за эксцентриситета влияет на площадь поясов сечения кольца, а как следствие — и на массу шпангоута. В фюзеляже совре-

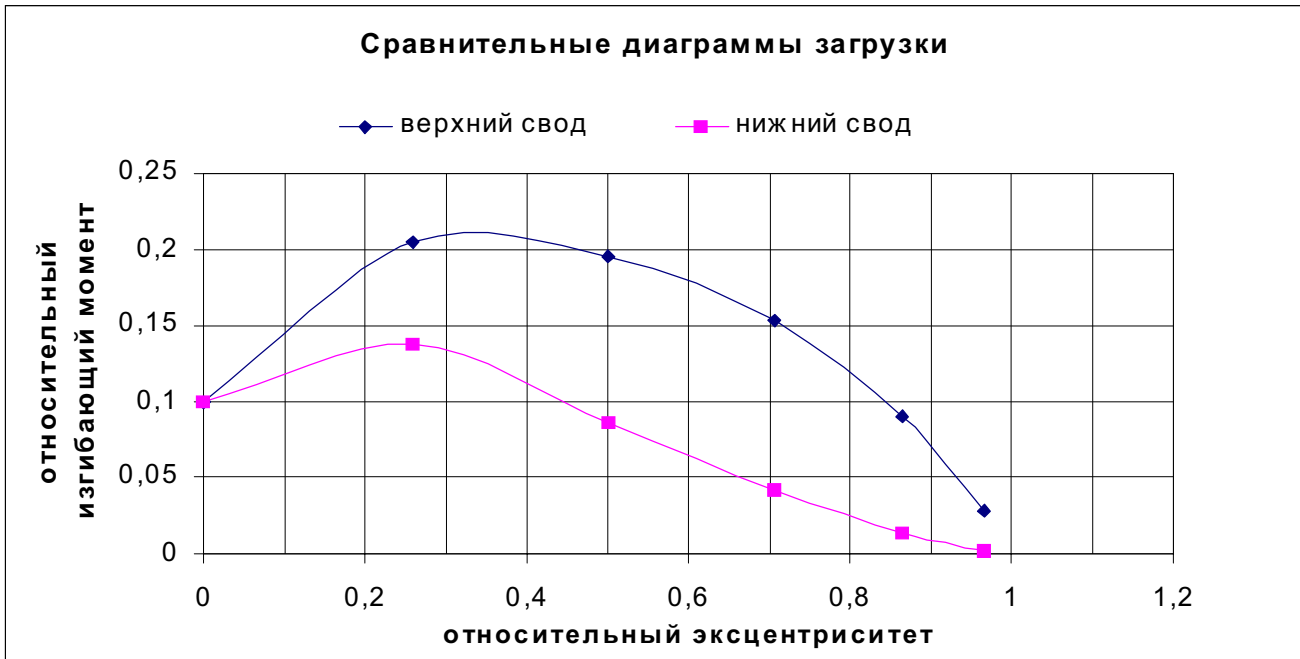


Рис. 11. Диаграммы загрузки изгибающим моментом сводов кольца шпангоута в зависимости от эксцентриситета смещения балочной части от сосредоточенного радиального усилия

менного истребителя встречаются полноразмерные силовые шпангоуты с кольцом, обладающие разной величиной эксцентриситета. Для того чтобы понять характер влияния изменения эксцентриситета на массу шпангоута, проанализируем статистику, накопленную в процессе проектирования перспективного истребителя интегральной схемы.

Чтобы иметь возможность сравнивать силовые шпангоуты различной размерности и формы, необходимо ввести понятие универсального параметра или показателя, который бы связывал массу шпангоута и параметр его размерности. Таким параметром может быть параметр удельной массы по площади главной проекции силового шпангоута

$q_S = \frac{m}{S}$. Этот параметр вполне удовлетворяет условиям сравнения, так как он связывает массу и размерность силового элемента и дает возможность сравнить между собой шпангоуты не только разных эксцентриситетов, но и разной размерности.

Рассматриваемые силовые шпангоуты имеют главную нагрузку от агрегатов крыла и оперения. Чтобы сравнение было корректным, необходимо сравнивать шпангоуты по параметру q_S только при том условии, что нагрузка на них одного порядка. Если же это не так, то необходимо провести сравнение этих шпангоутов и по универсальному параметру, который бы связывал массу шпангоута с главной нагрузкой.

Главной нагрузкой в данном случае может быть изгибающий момент $M_{изг}$ на узлах навески ОЧК, ГО или ВО на эти шпангоуты. Таким образом, аналогично параметру удельной по площади массы, можно рассмотреть и параметр удельной массы по главной нагрузке $q_M = \frac{m}{M_{изг}}$. Этот параметр дает возможность сравнивать шпангоуты с разным уровнем нагрузки от смежных агрегатов.

Так как интегральный фюзеляж перспективного истребителя достаточно плоский, то средняя стро-

ительная высота поперечных силовых элементов будет в разы меньше их длины. Соотношение длины и средней строительной высоты шпангоута во многом определяет его форму. Поэтому необходимо ввести понятие удлинения силового шпангоута

$\lambda = \frac{L}{H}$. Этот универсальный параметр формы сам

по себе безразмерный и показывает, насколько балочные части силового шпангоута «длинные» и «тонкие». Разумно предположить, что с ростом удлинения меняется и величина параметра $q_S = \frac{m}{S}$.

Имеющаяся статистика конструкции и массы шпангоутов охватывает шпангоуты с кольцом средней (СЧФ) и хвостовой части фюзеляжа (ХЧФ). Имеет смысл разделить эти шпангоуты на две группы по этому признаку, так как для шпангоутов СЧФ характерный относительный эксцентриситет находится в области 0,6, а для шпангоутов ХЧФ характерен малый относительный эксцентриситет, не превышающий 0,2. Рассмотрим динамику пара-

метров $q_S = \frac{m}{S}$ и $q_M = \frac{m}{M_{изг}}$ в зависимости от па-

раметра удлинения λ силового шпангоута интегрального фюзеляжа. Для этого соберем все необходимые параметры геометрии, массы и нагрузок на исследуемые шпангоуты в табл. 3 и 4.

Параметры полноразмерных шпангоутов ХЧФ с кольцом и относительным эксцентриситетом ϵ кольца относительно балочной части в пределах до 0,20 представлены в табл. 3.

Параметры полноразмерных шпангоутов центроплана с кольцом и относительным эксцентриситетом ϵ кольца относительно балочной части в пределах 0,60 представлены в табл. 4

На основании приведенных данных можно построить зависимости удельных масс от параметров удлинения и эксцентриситета (рис. 12).

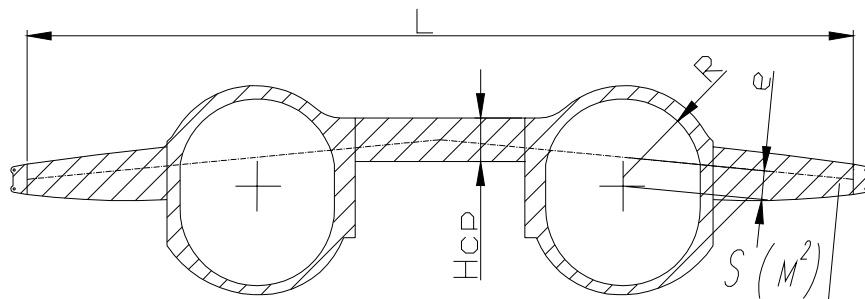
Таблица 3

λ	$S, \text{ м}^2$	$m, \text{ кг}$	$M, \text{ тс} \cdot \text{ м}$	$q_S, \text{ кг/м}^2$	$q_M, \text{ кг/(тс} \cdot \text{ м)}$	$\epsilon, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$	$\epsilon_{отн}$
19	1,926	68,6	10	35,3	6,86	106	1200	0,18
35,625	1,53	60	8,5	39,21	7,05	55	1170	0,10
40,714	1,219	48,5	5	39,78	9,7	20	1150	0,04

Таблица 4

λ	$S, \text{ м}^2$	$m, \text{ кг}$	$M, \text{ тс} \cdot \text{ м}$	$q_S, \text{ кг/м}^2$	$q_M, \text{ кг/(тс} \cdot \text{ м)}$	$\epsilon, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$	$\epsilon_{отн}$
15,00	2,4	105	17	56,05	6,17	326	1000	0,60
11,515	3,446	125	19	43,75	6,57	286	961	0,66

ПОЛНОРАЗМЕРНЫЙ ШПАНГОУТ С КОЛЬЦОМ



■ $e \approx 0,1$ $M_{изг} \approx 10 \text{ т} \times \text{М}$ $\bar{e} = \frac{e}{R}$ $q_s = \frac{m}{S} [\text{кг}/\text{М}^2]$ $\lambda = \frac{L}{HCP}$
■ $e \approx 0,3$ $M_{изг} \approx 18:20 \text{ т} \times \text{М}$

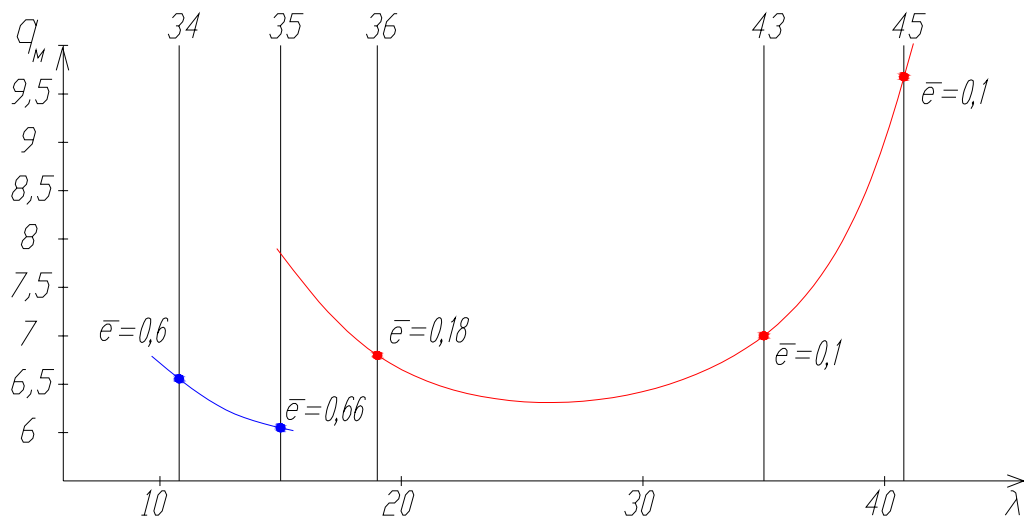
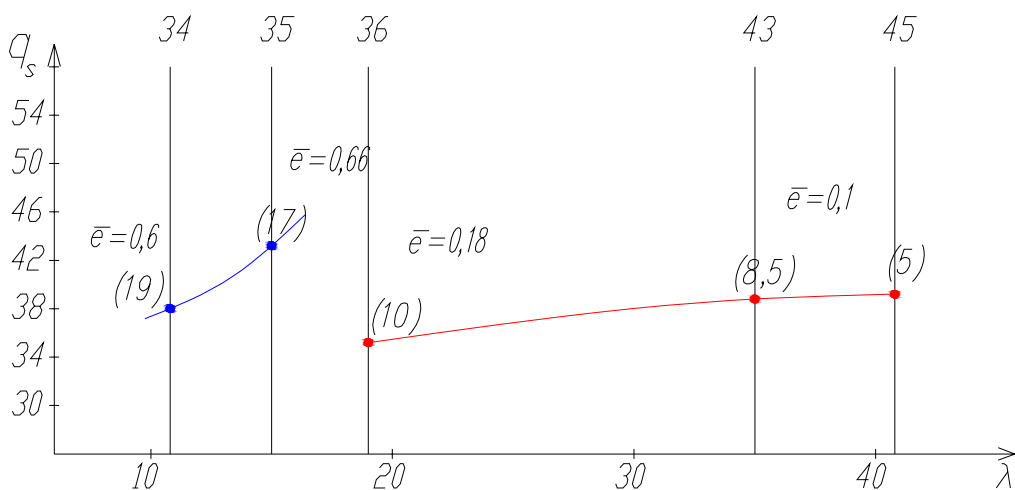


Рис. 12. Зависимости удельных масс q_s и q_M шпангоутов от удлинения λ и эксцентриситета \bar{e}

Анализ статистики показал, что в пределах одной схемы силового шпангоута существует нелинейная зависимость удельной массы шпангоута от удлинения. Также видно, что наклон полученной

кривой зависит от параметра относительного эксцентриситета. Из графиков удельной массы по площади видно, что наклон кривой удельной массы шпангоутов с большим эксцентриситетом круче,

чем наклон кривой удельной массы шпангоутов с малым эксцентриситетом.

Выводы

Параметр относительного эксцентриситета во многом определяет форму и распределение нагрузки в кольце шпангоута.

С увеличением относительного эксцентриситета увеличивается наклон кривой удельной массы шпангоута.

Шпангоуты с относительным эксцентриситетом более 0,6 не рациональны, так как неравномерность в загрузке верхнего и нижнего свода приводит к нагружению более протяженной зоны конструкции кольца с меньшими строительными высотами.

Применение схемы шпангоута с кольцом рационально по массе и распределению нагрузки при значениях относительного эксцентриситета до 0,3.

Параметр удлинения является одним из универсальных параметров, определяющих форму шпангоута в фюзеляже интегральной компоновки.

Существует определенная зависимость удельной массы шпангоутов от их параметров удлинения и эксцентриситета.

На основании приведенных статистических зависимостей удельных масс можно построить номограммы, которые помогут в выборе схем и параметров силовых шпангоутов на начальных этапах проектирования.

Использование диаграмм загрузки, формулы для определения максимального изгибающего момента в кольце шпангоута и статистических диаграмм удельных масс может помочь в выборе схемы и формы как шпангоутов, так и фюзеляжа в целом.

Библиографический список

1. *Астахов М.Ф., Караваев А.В.* и др. Справочная книга по расчету самолетов на прочность. — М.: Оборонгиз, 1955.

2. *Бирюк В.И., Голован В.И., Скворцов Е.Б., Теплицын М.П.* Конструктивно-силовые схемы для перспективных широкофюзеляжных самолетов интегральной компоновки // Труды ЦАГИ. 1997.

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)