

Проектный анализ конструкции стабилизатора с различным типом закрепления

С. Ч. Ю, Ю. И. Попов

В работе проведено исследование конструкции стабилизатора горизонтального оперения лонжеронной, кессонной и моноблочной КСС при различных видах закрепления оперения (консольное, четырех- и трехточечное) на фюзеляже и киле, применяемых в гражданских транспортных самолетах местных авиалиний. Исследование проводилось в системе NASTRAN for windows. Задача состоит в определении картины распределения усилий и напряжений в элементах нерегулярной зоны конструкции стабилизатора.

В задаче создания безопасной конструкции минимального веса, наряду с вопросами проектирования и определения рациональных параметров элементов сечения регулярной конструкции стабилизатора, необходимо рассмотреть вопрос о влиянии типа закрепления стабилизатора на фюзеляже или киле на напряженно-деформируемое состояние (НДС) и вес конструкции. Сущность этого вопроса состоит в понимании картины распределения напряжений при различном закреплении и учете дополнительных напряжений, влияющих на надежность конструкции и ее вес.

Широкое обсуждение получил случай усталостного разрушения верхнего пояса заднего лонжерона неподвижно закрепленного стабилизатора в зоне бортовой нервюры (катастрофа в г. Лусака грузового самолета). Проектирование конструкции с учетом сопротивления усталости сводится к тщательному исследованию напряженного состояния элементов конструкции и к определению уровня разрушающих напряжений. Расчет стабилизатора обычно ведется методами, разработанными применительно к крылу. Учитывая особенности закрепления и некоторые конструктивные отличия переставного стабилизатора, очевидна необходимость проведения специальных исследований и сравнения НДС конструкций неподвижно закрепленного и переставного стабилизатора.

Горизонтальное оперение, модели которого рассматриваются в данной работе, состоит из стабилизатора и руля высоты и может быть установлено либо в хвостовой части фюзеляжа, либо на киле. Анализу подлежит силовая часть конструкции стабилизатора - кессон с узлами крепления и навески руля высоты. Количество и расположение узлов закрепления кессона варьируется.

Так как горизонтальное оперение самолетов местных авиалиний обычно нестреловидное, двухлонжеронной конструкции, анализу подлежит нестреловидная конструкция стабилизатора

лонжеронной и моноблочной конструктивно-силовых схем с наиболее характерными вариантами закрепления на фюзеляже и киле:

-неподвижный стабилизатор с двумя моментными узлами крепления на шпангоутах фюзеляжа - консольный стабилизатор (рис.1,а);

-неподвижный стабилизатор, навешанный на фюзеляже или киле на четырех точечных шарнирных узлах - четырехточечное закрепление (рис.1,б);

-переставной стабилизатор, имеющий два точечных шарнирных узла по бортовым нервюрам на одном лонжероне, представляющих ось вращения стабилизатора, и один центральный узел крепления на силовом цилиндре управления стабилизатором, расположенный на другом лонжероне - трехточечное закрепление (рис.1,в).

Исходная конструкция стабилизатора выполнена по моноблочной конструктивно-силовой схеме с центральной силовой частью. Конструкция центральной части может быть различной при закреплении на фюзеляже и на киле (рис.2).

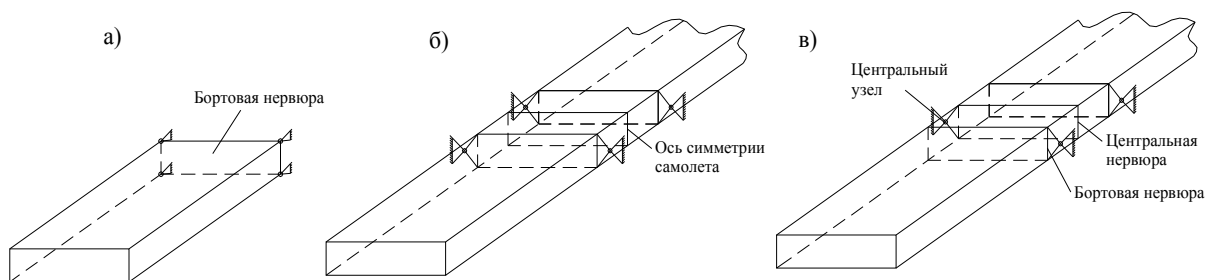


Рис.1. Схемы моделей кессона стабилизатора при различном закреплении:
а) консольное; б) четырехточечное; в) трехточечное

Цельный силовой кессон-моноблок с типовыми бортовой и центральной нервюрами

Переставной стабилизатор с косыми нервюрами

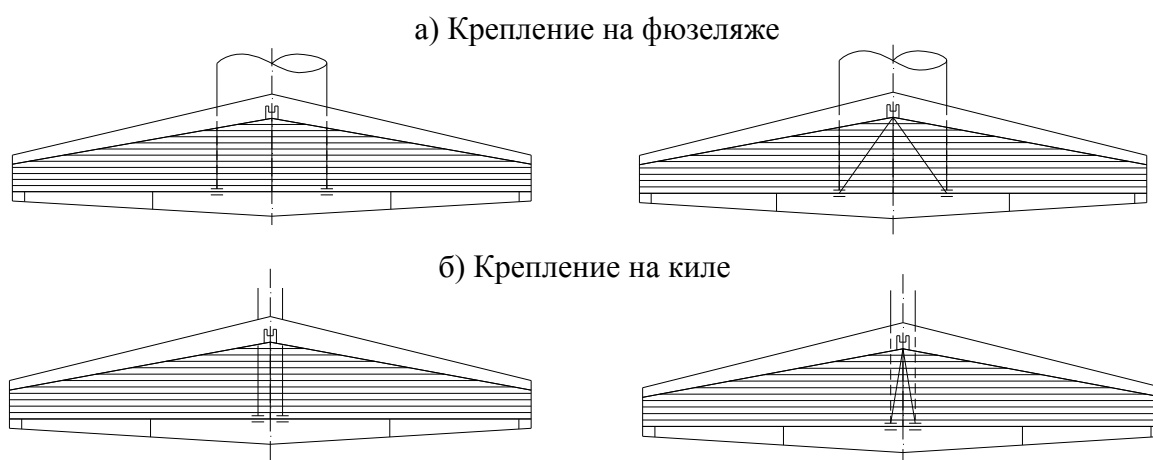


Рис.2. Варианты конструктивно-силовых схем переставного стабилизатора

Расчет НДС ведется методом конечного элемента по программе MSN/NASTRAN for Windows. Исследование проводится вначале на упрощенной модели стабилизатора (рис.3), которая представляет собой двухлонжеронный кессон постоянного поперечного сечения, имеющего вид прямоугольника. Нервюры расположены перпендикулярно лонжеронам. Модель симметрична относительно срединной плоскости. Номера расчетных сечений конечно-элементной модели по размаху кессона обозначены через z, по хорде – x.

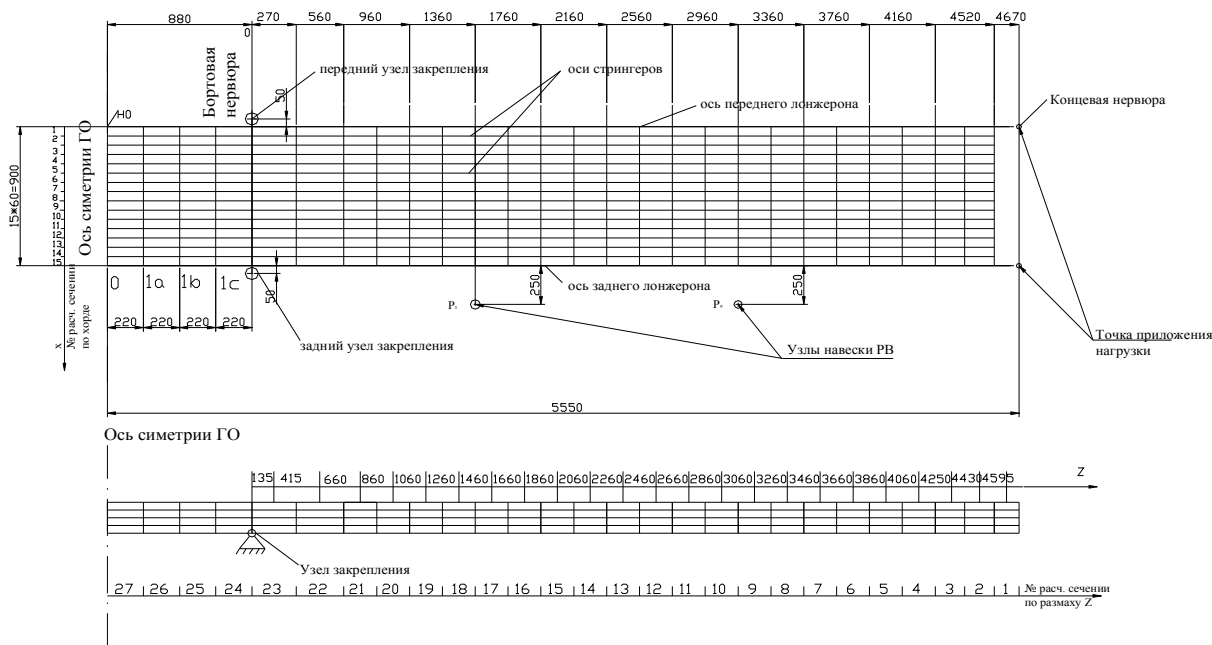


Рис.3. Схема конечно-элементной модели основного варианта

Геометрические и жесткостные характеристики модели определяют следующие параметры:

B – ширина кессона; H – строительная высота; l – полуразмах; l_k – длина консоли; Δx – расстояние от лонжеронов до опорных узлов; A – расстояние между бортовыми нервюрами; $\delta_{об}$ – толщина обшивки; $\delta_{с.л}$ – толщина стенок лонжеронов; $\delta_{с.н}$ – толщина стенок нервюр; $f_{стр}$ – площадь стрингеров; F_n – площадь поясов лонжеронов; E, G – модули упругости материала.

Этим параметрам выбраны значения, которые в среднем соответствуют геометрическим и жесткостным характеристикам реальных конструкций. После обработки данных по стабилизатору одного легкого транспортного самолета получено:

$B = 900$ мм; $H = 250$ мм; $\Delta x = 50$ мм; $\delta_{об} = 1,2$ мм; $\delta_{с.л} = 1,2$ мм; $\delta_{с.н} = 0,8$ мм;
 $f_{стр} = 60$ мм²; количество стрингеров – 14, $F_n = 350$ мм², $E/G=2,67$.

Длина полуразмаха стабилизатора $l=5550$ мм выбрана такой, чтобы на этой длине полностью затухали возмущения, возникающие в зоне опорных узлов. При этом отношение l к ширине кессона B равно 6. Значение l_k различно для стабилизатора, закрепленного на фюзеляже при $A= 880$ мм или на киле $A = 220$ мм.

НДС кессона исследуется при внешнем нагружении сосредоточенными силами, приложенными в концевом сечении по лонжеронам: при поперечном изгибе $P_1=P_2=1200$ даН,

кручении парой сил $P_3=-P_4=1000$ даН и несимметричном нагружении при 100% и 70% по консолям.

Модели стабилизатора с четырехточечным закреплением обозначены шифром М1В1, с трехточечным закреплением – М1В2.

Достоверность конечно-элементной модели устанавливается сравнением расчетов, проведенных МКЭ, с расчетами по балочной теории в регулярной зоне конструкции.

Распределение нормальных напряжений в поясах лонжеронов по длине кессона показано на рис.4. Видно, что в регулярной зоне напряжения по балочной теории и по МКЭ одинаковы, что подтверждает достоверность конечно-элементной модели.

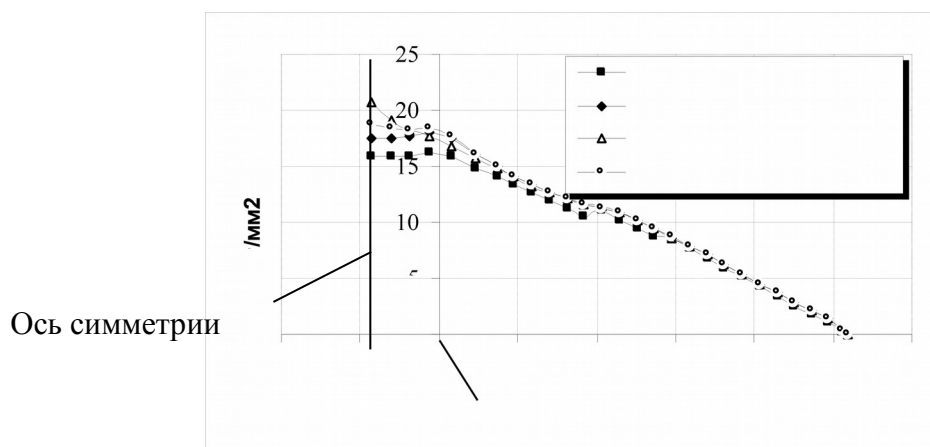


Рис.4. Сравнительные графики нормальных напряжений по балочной теории и МКЭ в поясах лонжеронов 4-х и 3-х точечного закрепления кессона

На рис.5. приведены графики нормальных напряжений в поясах лонжеронов рассматриваемых моделей по всей длине стабилизатора при поперечном изгибе. Видно, что в регулярной зоне конструкции напряжения одинаковы и не зависят от варианта закрепления.

В области стыковых узлов при четырехточечном закреплении напряжения соответствуют значениям, определенным по балочной теории. Для стабилизатора с 3-х точечным закреплением в зоне бортовой нервюры напряжения в поясах заднего лонжерона больше, а в поясах переднего лонжерона меньше, чем при 4-х точечном закреплении. Это объясняется присутствием эффекта стреловидности, когда более короткий лонжерон является более жестким и соответственно принимает на себя большую часть изгибающего момента. В центральной части стабилизатора от бортовой нервюры до оси симметрии напряжения в поясах переднего лонжерона увеличиваются значительно.

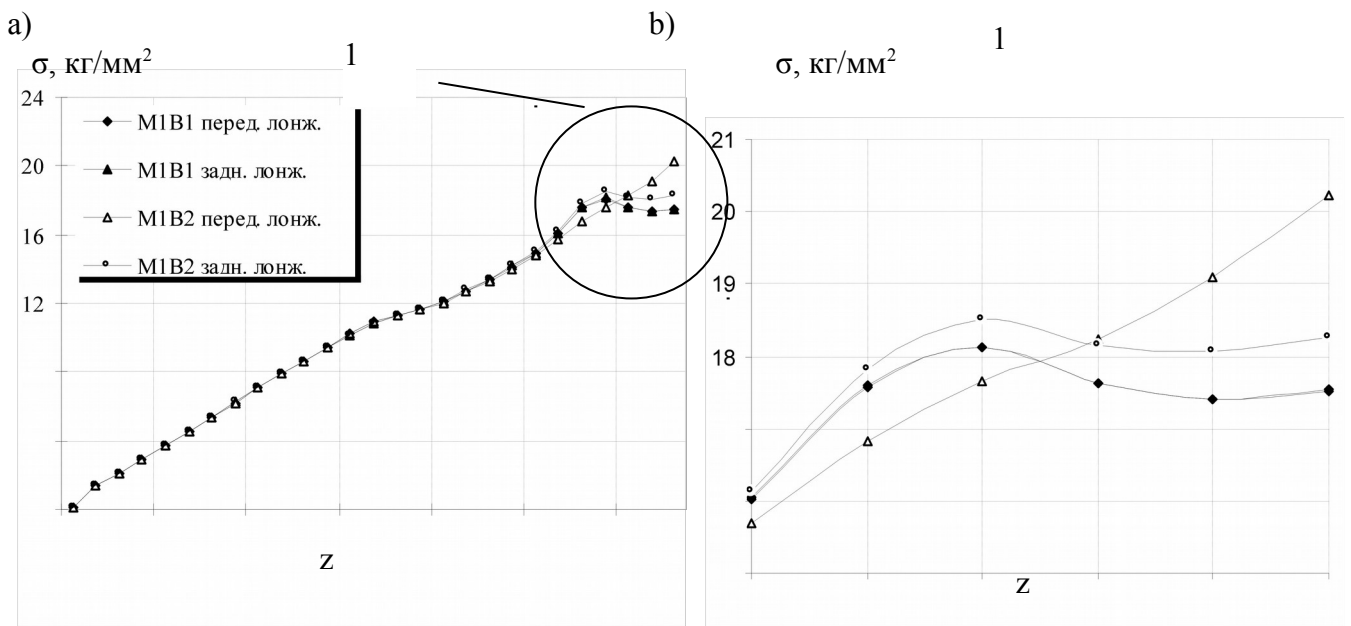


Рис.5. Нормальные напряжения в поясах лонжеронов

На рис.6. показаны эквивалентные напряжения в стрингерных панелях по размаху стабилизатора. В местах обрыва стрингеров наблюдается всплеск напряжений примерно на 7~10%, что отражается на поведении графика рис.6 в зоне обрыва стрингеров.

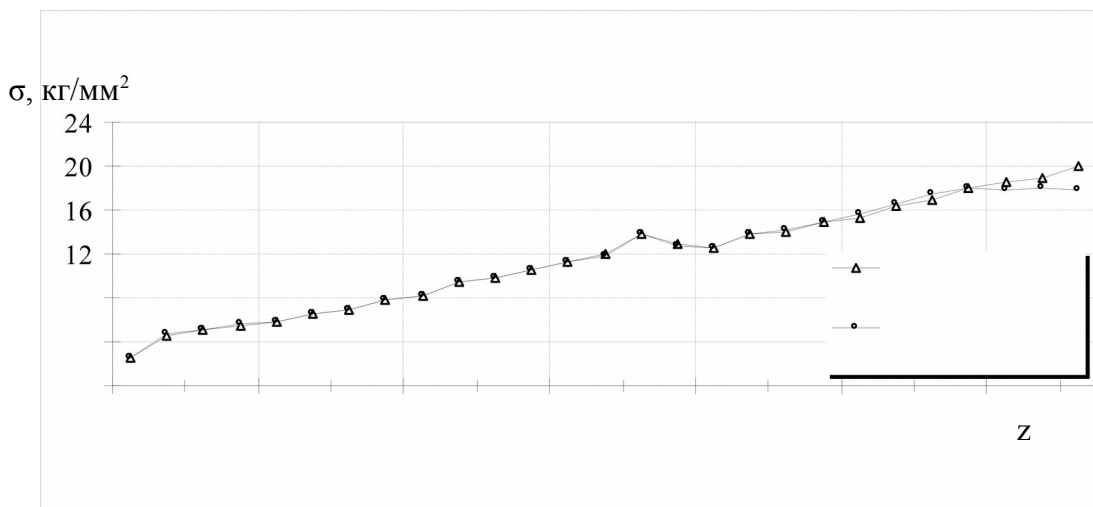


Рис.6. Эквивалентные напряжения в стрингерных панелях по размаху стабилизатора

На рис.7. приведены графики распределения нормальных напряжений в обшивке панелей центральной части конструкции стабилизатора по хорде в сечениях по бортовой и центральной нервюре. Видно, что при 4-х точечном закреплении напряжения почти одинаковы и соответствуют напряжениям в поясах лонжеронов. При 3-х точечном закреплении напряжения в районе переднего лонжерона значительно выше, чем при 4-х точечном закреплении.

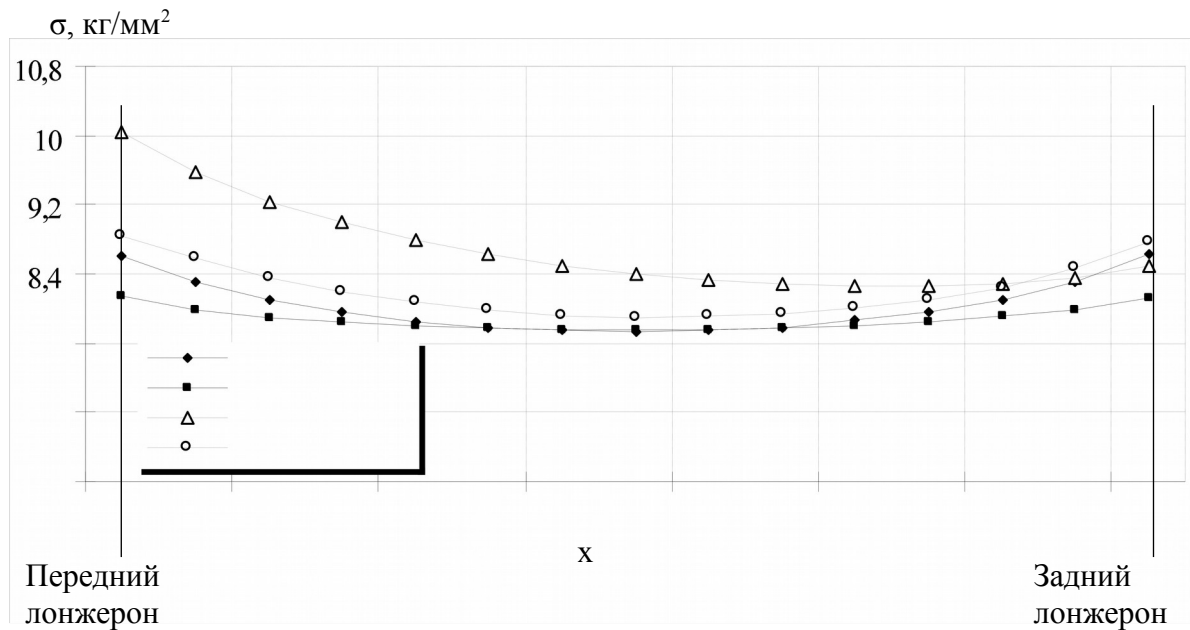


Рис.7. Распределение нормальных напряжений в обшивке панелей

На рис.8,а приведены графики распределения касательных напряжений в обшивке панелей при кручении по длине стабилизатора. В регулярной зоне конструкции напряжения одинаковы для рассматриваемых вариантов закрепления стабилизатора.

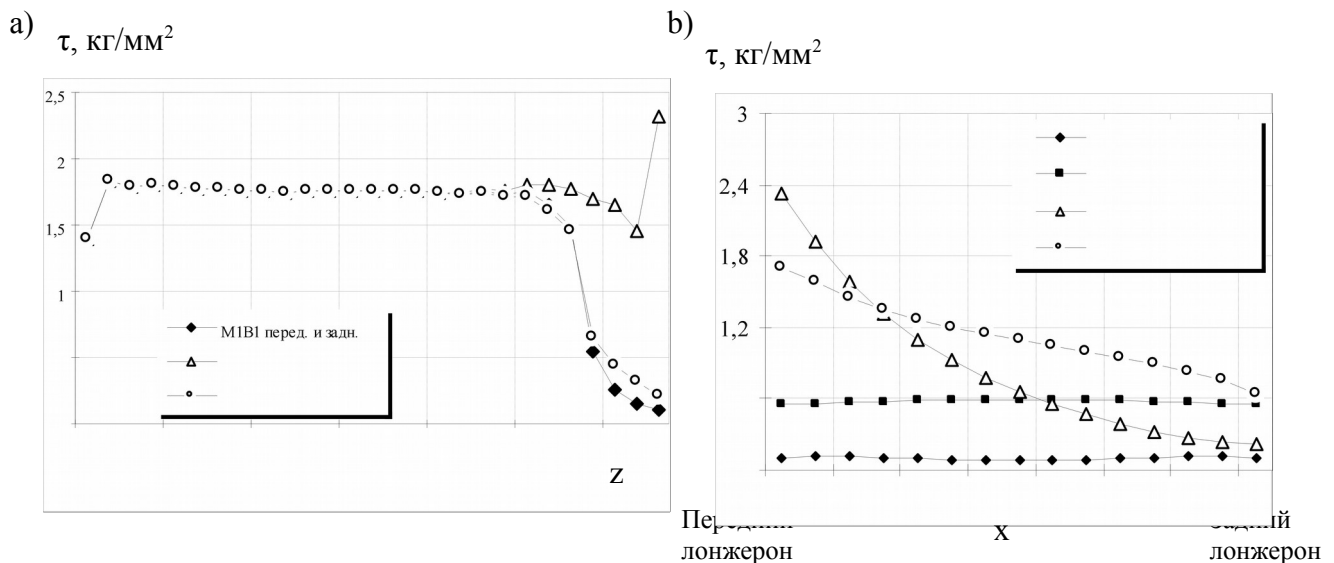


Рис.8. Касательные напряжения в обшивке при кручении

При 4-х точечном креплении крутящий момент уравнивается парой сил реакций в узлах по бортовой нервюры и далее в центральную часть не передается. В конструкции переставного стабилизатора обшивка в центральной части около заднего лонжерона также не нагружена касательными усилиями. В области переднего лонжерона уровень касательных напряжений около бортовой нервюры практически не меняется и резко увеличивается у центральной нервюры возле узла крепления.

На рис.8,b показаны графики распределения касательных напряжений по хорде стабилизатора около бортовой и центральной нервюр при рассматриваемых вариантах закрепления. Очень характерно поведение кривых в конструкции с 3-х точечным закреплением: резкое изменение вдоль центральной нервюры и довольно плавное вдоль бортовой нервюры. Можно предположить, что при действии крутящего момента нагружение обшивки панелей касательными усилиями идет вдоль линий, соединяющих центральный узел с задними узлами крепления, то есть по направлению косых нервюр.

На рис.9. даны графики нормальных напряжений в поясе бортовой нервюры для симметричного и несимметричного нагружения при трехточечном закреплении. При симметричном приложении силы более нагруженной оказывается передняя часть бортовой нервюры ($1 \leq x \leq 10$), тогда как при несимметричном нагружении нервюры в основном работает на участке $10 \leq x \leq 15$.

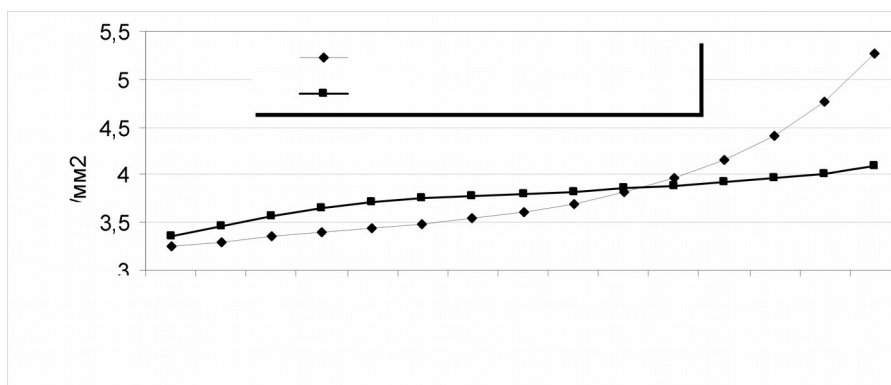


Рис.9. Нормальные напряжения в поясе бортовой нервюры M1B2.

Расчеты показали, что деформации стабилизатора (прогиб и угол закручивания концевое сечения) с 3-х точечным креплением примерно на 3-5 % больше, чем при 4-х точечном креплении.

Таким образом, можно сделать вывод, что в конструкции переставного стабилизатора с трехточечным закреплением напряженное состояние всех конструктивных элементов в зоне стыковых узлов при поперечном изгибе и при кручении в значительной степени отличается от напряженного состояния при четырехточечном креплении стабилизатора. Особенно это относится к нагружению касательными усилиями обшивки панелей центральной части стабилизатора при кручении.

Проведена оценка массы элементов конструкции кессона при различном закреплении. Предлагается способ оценки изменения массы элементов конструкции кессона с трехточечным закреплением по сравнению с четырехточечным закреплением по графикам изменения напряжений по элементам. Графики изменения напряжений представляются в виде графиков погонной нагрузки по размаху и хорде кессона в нерегулярной зоне. Интегрирование производится по участкам вдоль хорды и размаха кессона. За исходную схему принимается четырехточечное

закрепление кессона. Изменение массы элементов при трехточечном креплении соответствует изменению напряжений $\Delta\sigma$ и потока касательных усилий Δq в элементах. Тогда для элементов, воспринимающих нормальные напряжения,

$$\Delta M = \frac{\sum_1^n \Delta\sigma}{\sigma} \cdot 100\% \quad (1)$$

для элементов, воспринимающих касательные напряжения,

$$\Delta M = \frac{\sum_1^n \Delta q}{q} \cdot 100\% \quad (2)$$

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Массовая оценка

Сравнительная массовая оценка кессона с 3-х и 4-х точечным креплением					
Элементы конструкции	ΔM_{\max}	$\Delta M\%$ на фюзеляже	ΔM_{\max}	$\Delta M\%$ на киле	
Пояс лонжерона передний	18%	10%	9%	3%	
Пояс лонжерона задний	7%	5%	4%	2,3%	
Обшивка около центральной нервюры	17%	8%		2%	
Обшивка около бортовой нервюры	9%	4%		1,5%	
Масса в нерегулярной зоне		7%		2%	
Масса стабилизатора		1%		0,7%	

Далее проводится формирование конечно-элементной модели конструкции всего горизонтального оперения (стабилизатор с рулем высоты, рис.10) с различным типом крепления, сравнительный анализ НДС и массы конструкции при нормируемых случаях нагружения.

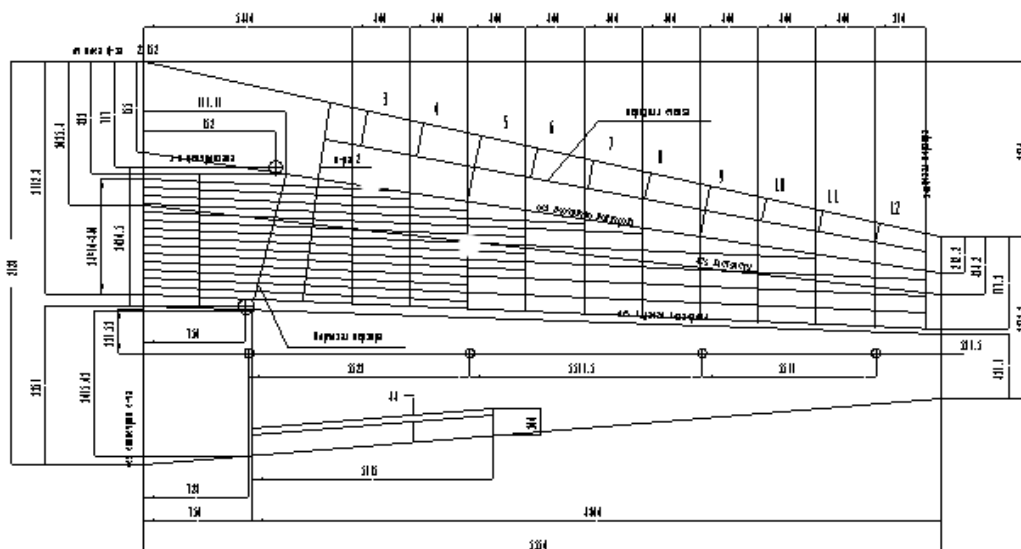


Рис.10. Схема горизонтального оперения

Исследование проводится на модели стабилизатора, которая представляет собой конструкцию моноблочной КСС, состоящую из центроплана, носовой и кессонной частей

консолей, хвостовой части консолей с узлами навески руля высоты, узлов крепления стабилизатора к фюзеляжу.

В качестве расчетных нагрузок на ГО выбраны следующие случаи нагружения.

Таблица 2.

СЛУЧАЙ НАГРУЖЕНИЯ	Ру возд (на все ГО с учетом фюзеляжа). [кг]	Ру расч. На одну консоль стабилизатора (воздух+инерция) [кг]	Ру РВ (воздух на одну консоль) [кг]
“ ГП -ДР “ 2-ой случай распределения	- 12570	-3036	-2490
НЕСП.ВОЗДУХ (НВ) 3-ий случай распределения	- 14830	-5930	0
НЕСП.ВОЗДУХ (НВ) 3-ий случай распределения		100%-правая консоль 70%-левая консоль	

На рис.11. показано НДС элементов конструкции стабилизатора при различных случаях нагружения при четырехточечном закреплении (схема 1), на рис.12 – переставного ГО (схема 2), на рис.13 –консольного стабилизатора (схема 3).

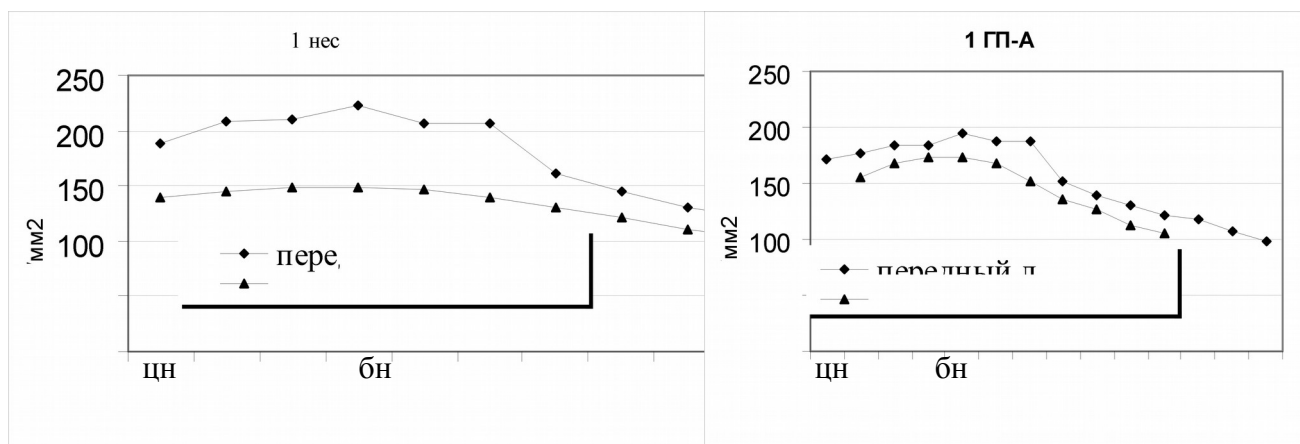
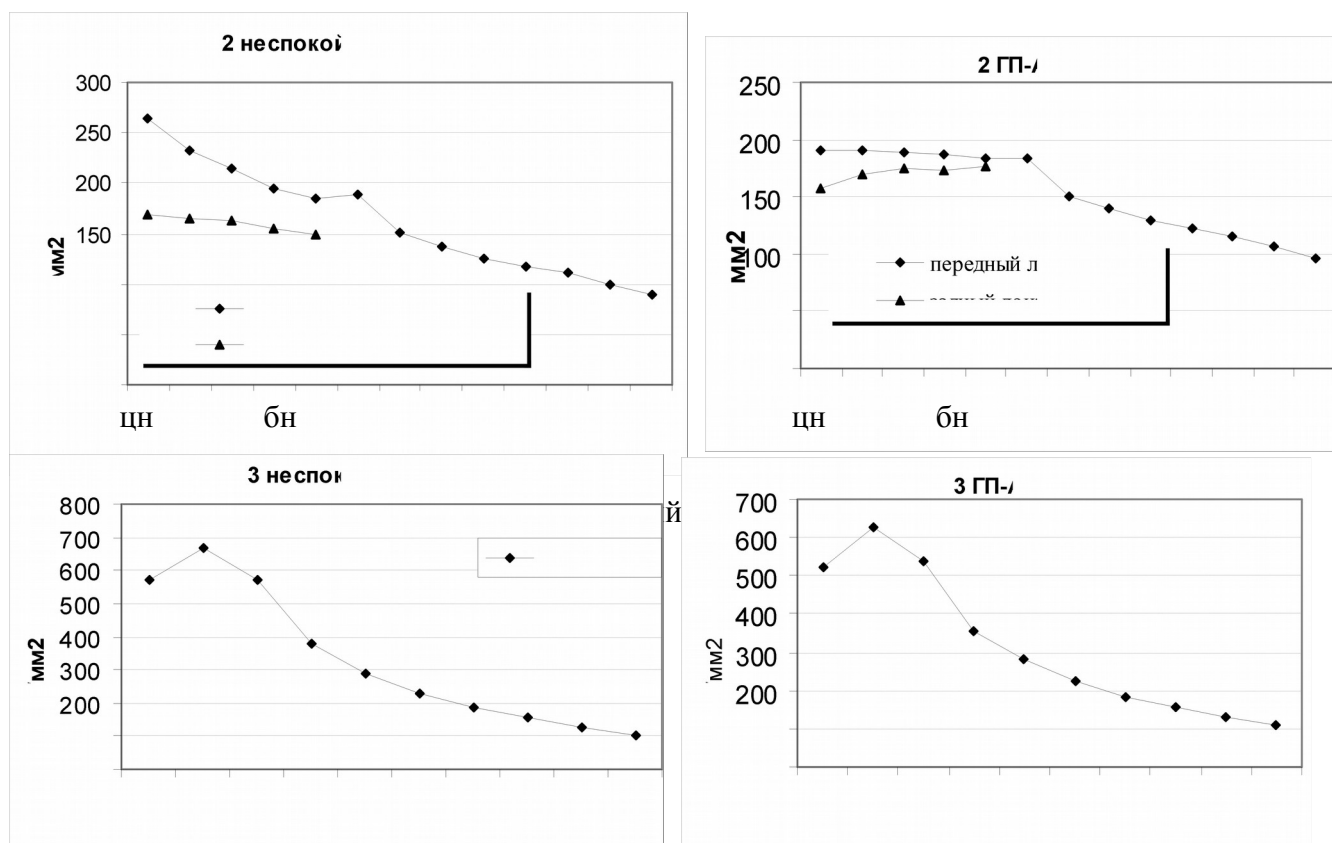


Рис.11. Распределение нормальных напряжений по поясам лонжеронов

$\sigma, \text{Н/мм}^2$



бн

бн

Рис.13. Распределение нормальных напряжений по переднему лонжерону

В расчетном случае НВ наблюдается концентрация касательных напряжений в обшивке, прилегающей к переднему лонжерону в районе центральной нервюры, на 35%, концентрация нормальных напряжений в поясах лонжеронов - на 12%.

Сравнительные графики касательных напряжений в обшивке нижней панели стабилизатора при 4-х и 3-х точечном закреплении приводятся на рис.14 (1-центральная нервюра, 2-бортовая нервюра), рис 15, 16 – в стенках нервюр и лонжеронов при расчетных случаях.

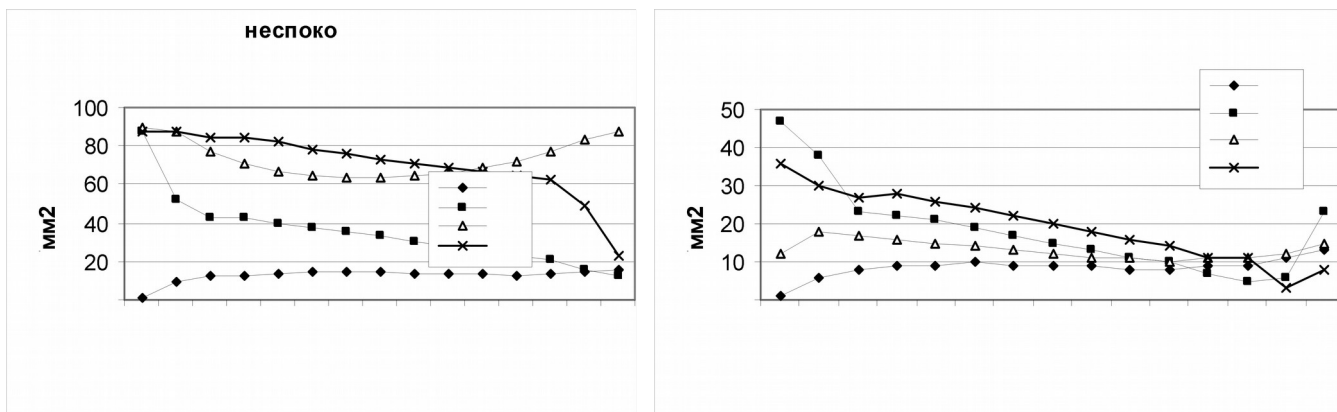


Рис.14. Типовое распределение касательных напряжений в обшивке панелей в нерегулярных зонах

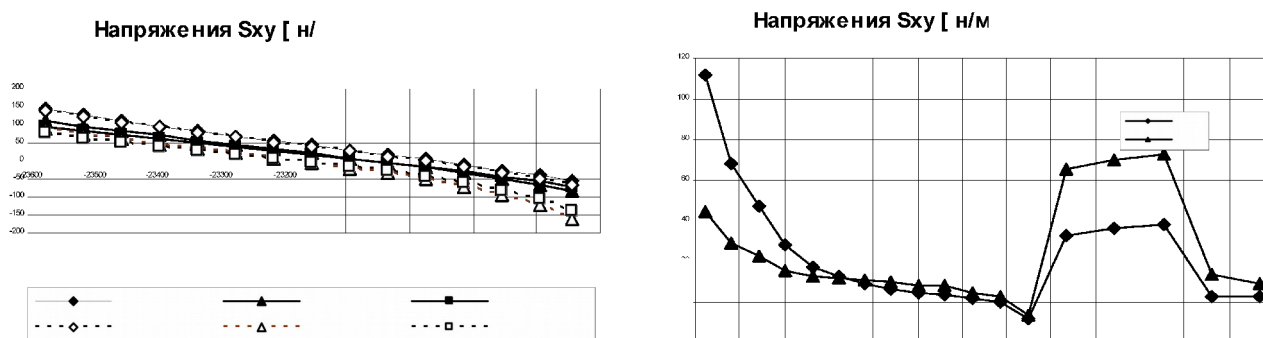


Рис.15. Распределение напряжений в стенках нервюр

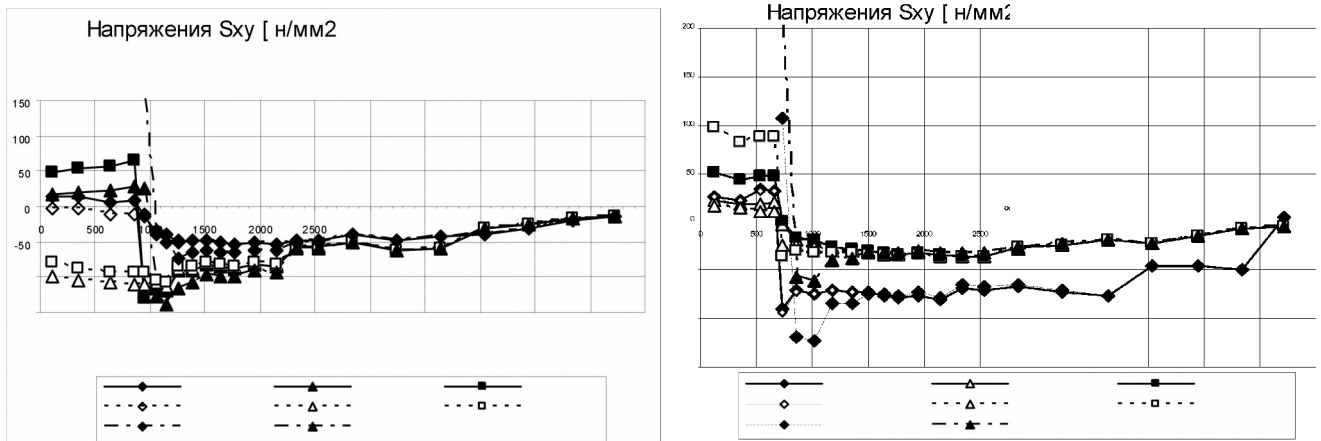


Рис.16. Распределение напряжений в стенках лонжеронов

Проведена оценка изменения массы элементов конструкции стабилизатора, расположенных в области узлов крепления, аналогично оценке изменения массы кессона, проведенной по формулам (1), (2). Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Сравнительная массовая оценка элементов конструкции ГО при четырех- и трехточечном закреплении

Расчетный случай	Элементы конструкции	$\Delta M\%$
Неспокойный воздух	пояс лонжерона передний	10%
	пояс лонжерона задний	12%
	обшивка около центральной нервюры	34%
	обшивка около бортовой нервюры	15%
ГП-ДР	пояс лонжерона передний	2%
	пояс лонжерона задний	1%
	обшивка около центральной нервюры	20%
	обшивка около бортовой нервюры	5%

Список литературы

1. Абрамов В.И., Оценка долговечности нерегулярных зон конструкции планера на стадии проектирования /Васин В.Е., Чувилин О.В.// Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по прочности летательных аппаратов. Казань, 1988.- с. 21-34.
 2. Напряженное состояние стреловидного стабилизатора с трехточечным креплением./ Иванов Ю. И., Мазур В. В., Мажорина В. А.// Труды ЦАГИ, 1973.- вып. 1458.- 23 с.
 3. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSN/NASTRAN for Windows. – М.:ДМК Пресс, 2001.- 448 с., ил. (Серия «проектирование»).
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ю Сун Чул, аспирант кафедры проектирование самолетов Московского авиационного института (государственного технического университета)

Попов Юрий Иванович, доцент кафедры проектирование самолетов Московского авиационного института (государственного технического университета). к.т.н.