УДК 629.7:539.4

Д.М. Козлов, В.Н. Майнсков

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ВАРИАНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ХВОСТОВОЙ ЧАСТИ САМОЛЕТА С Т-ОБРАЗНЫМ ОПЕРЕНИЕМ

Силовая работа хвостовой части самолета во многом определяется расположением силовых шпангоутов, воспринимающих большие сосредоточенные силы от оперения. На самолетах со стреловидным Т-образным оперением широко распространены два варианта расположения шпангоутов для крепления киля:

I) плоскости перпендикулярны продольной оси самолета;

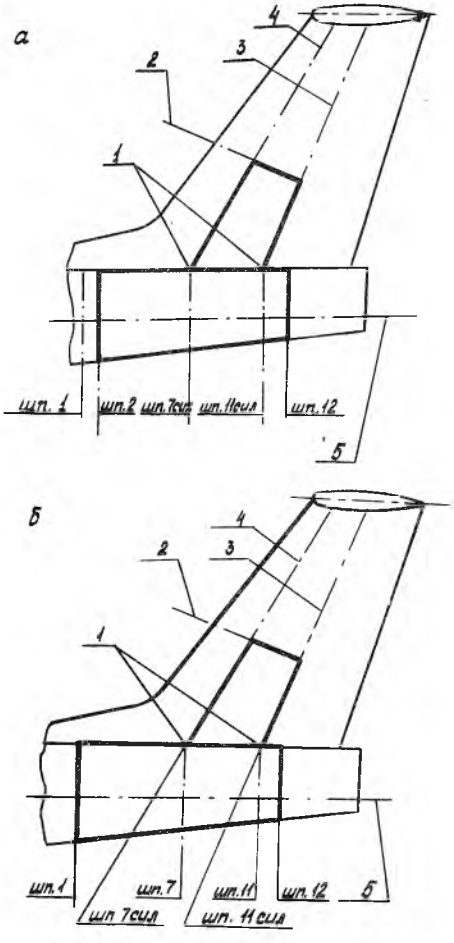
2) плоскости шпангоутов совпадают с плоскостями соответствующих лонжеронов киля. Однако сравнение силовой работы и весовой эффективности этих вариантов силовых схем хвостовой части самолета в литературе не обсуждалось, и рекомендации по выбору расположения силовых шпангоутов для крепления стреловидного вертикального оперения отсутствуют.

В данной статье рассматриваются результаты расчета методом конечных элементов хвостовой части одного реального гидросамолета. Анализируется силовая работа корневой части киля совместно с отсеком фюзеляжа для указанных вариантов расположения силовых шпангоутов. С применением алгоритма отыскания равнопрочных конструкций [I] проводится сравнение массы отсека фюзеляжа для этих вариантов силовой схемы.

Все расчеты выполнены с использованием комплекса ПРАСАК [2].

На рис.I показаны два варианта схемы хвостовой части самолета, отличающиеся расположением силовых шпангоутов, обозначенные как "ПС" и "КС".

Фюзеляж самолета балочно-стрингерной конструкции имеет в хвостовой части форму поперечного сечения, традиционную для гидросамолетов. Рядовые шпангоуты Z -образного поперечного сечения соединяются с обшивкой при помощи компенсаторов, стрингеры из прессованных профилей склепываются с обшивкой толщиной I,5 ÷ 2 мм. Два силовых шпангоута для крепления киля - рамного типа, клепаной конструкции. Киль лонжеронной конструкции с двумя лонжеронами, расположенными на I5 и 5I процентах хорды. Угол стреловидности киля по осям лонжеронов около 30°.



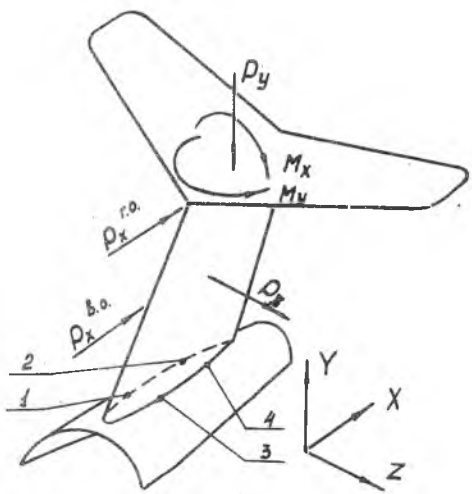
Р и с. I.Схема хвостовой части самолета: а - прямая схема(ПС),б-косая схема (КС)-I-стыковые узлы;2-ось нервюры;3-ось П лонжерона;4-ось I лонжерона;5- ось самолета

Лонжероны и нервюры балочной конструкции. Нервюры располагаются перпендикулярно заднему лонжерону. Обшивка толщиной I,5 мм подкреплена стрингерами уголкового сечения с суммарной площадью в корне около 8 см^2. Пояса переднего и заднего лонжеронов в корневом сечении имеют площади соответственно 26 см^2 и 39 см^2.

Киль крепится к двум силовым шпангоутам фюзеляжа в четырех точках по поясам лонжеронов с помощью фитингов и стяжных болтов. Площади поперечных сечений силовых элементов конструкции соответствуют чертежам, разработанным в конструкторском бюро на этапе эскизного проектирования. В обеих схемах они одинаковы для всех элементов, кроме силовых шпангоутов.

Расчеты сделаны для наиболее тяжелого случая нагружения, рекомендованного конструкторским бюро: нагружение вертикального оперения маневренной нагрузкой и горизонтального оперения - уравновешивающей нагрузкой с учетом несимметрии.

Схема нагружения показана на рис.2.



Р и с.2. Схема нагружения хвостовой части самолета:I,2,3,4 - стыковые узлы

Расчетные значения нагрузок приведены в таблице I.

Таблица I

Нагрузки на вертикальное оперение		Нагрузки на горизонтальное оперение			
P_x, Н	P_z, Н	P_y, Н	M_x, Нм	P_x, Н	M_y, Нм
342I5	273694	-96373	3303I9	I5290	32594

Рассматривались два варианта распределения нагрузок по хорде вертикального оперения, показанные на рис.3 и в дальнейшем обозначаемые как "ЗЦД"(задний центр давления) и "ПЦД"(передний центр давления).

Конечноэлементная модель (КЭМ) для каждого из двух вариантов силовой схемы включает корневую часть киля, ограниченную нервюрой 9, и отсек фюзеляжа между шпангоутами I и I2 в схеме КС, 2 и I2 в схеме ПС.

На рис.I эти зоны конструкции выделены толстыми линиями. Для каждого варианта силовой схемы КЭМ составлена из 800-900 конечных элементов. Степень кинематической неопределимости моделей около I500.

Так как основной целью расчета был анализ силовой работы конструкции фюзеляжа, сетка конечных элементов на киле выполнена более грубой по сравнению с сеткой на фюзеляже.

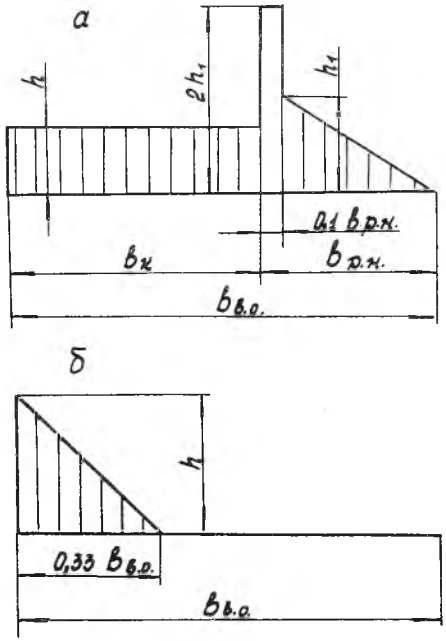


Рис.3.Распределение воздушной нагрузки по хорде вертикального оперения:а-ЗЦД(задний центр давления), б-ПЦД(передний центр давления)

Лонжероны и нервюры киля, рядовые шпангоуты фюзеляжа представлены в расчетных моделях элементами "двутавр". С целью сокращения исходной информации о КЭМ стрингеры киля смоделированы не стержневыми элементами, а поясами элементов"двутавр",имеющих стенки весьма малой толщины. Стрингеры фюзеляжа представлены стержневыми элементами, силовые шпангоуты - набором стержней и четырехугольных сдвигов элементов. Сравнительно тонкая обшивка киля и фюзеляжа моделировалась также сдвиговыми четырехугольниками. Соединение киля и фюзеляжа в КЭМ осуществлено в четырех узлах, принадлежащих одновременно элементам лонжеронов киля и силовых шпангоутов фюзеляжа. В схеме КС узлы, принадлежащие рядовым шпангоутам 7 и II и совпадающие со стыковыми узлами, закодированы другими номерами. Это обеспечивает соединение лонжеронов киля в этой схеме только с наклонными силовыми шпангоутами.

При назначении жесткостных характеристик элементов КЭМ к стрингерам киля и фюзеляжа, к поясам лонжеронов киля, а также к подкрепляющим профилям силовых шпангоутов присоединялись полоски обшивки или стенок шпангоутов шириной 30 δ (δ - толщина обшивки или стенки). Стрингеры и подкрепляющие профили стягивались в ближайшие стержневые элементы. Толщины сдвиговых четырехугольных элементов принимались по чертежам.

Нагрузки на конструкцию, заданные эпюрами продольных и поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов, заменялись статически эквивалентной системой сосредоточенных сил, приложенных в узлах КЭМ.Считалось, что сечения по нервюре 9 киля и шпангоутам I и 2 фюзеляжа достаточно удалены от узлов крепления киля и силовых шпангоутов фюзеляжа. Поэтому нагрузки от отсеченных частей конструкции определялись по методу сечений и прикладывались в соответствующих узлах КЭМ.

В соответствии с целями работы для каждой КЭМ было сделано по три итерации по алгоритму отыскания равнопрочного распределения материала [I] .

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния конструкции на каждой итерации построены потоки главных усилий(ПГУ) в узлах сетки киля и фюзеляжа, определены усилия в узлах стыка киля с фюзеляжем, получены значения массы условно равнопрочной конструкции рассматриваемой части киля совместно с фюзеляжем и потребной массы фюзеляжа.

Компоненты ПГУ в узлах определялись следующим образом. Осреднялись значения усилий в стержневых элементах, прилегающих к узлу, и вычислялись потоки нормальных усилий в конструкции с"размазанными" стержнями. Потоки касательных сил принимались средними по четырем прилегающим к узлу сдвиговым элементам.

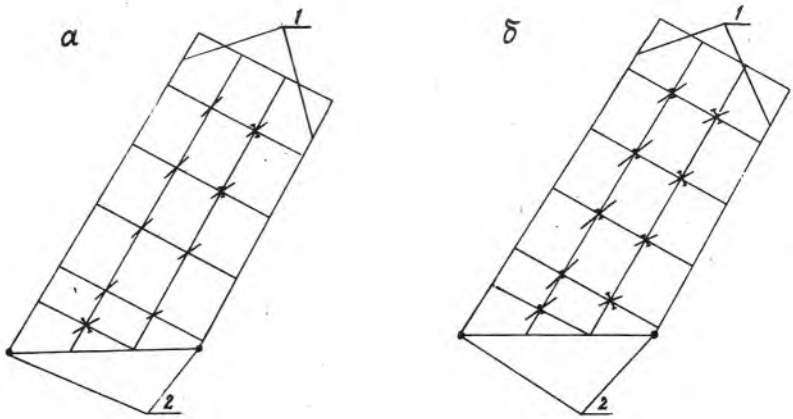
В таблице 2 представлены усилия в стыке киля с фюзеляжем, а на рис.4,5 показаны ПГУ в конструкции киля по результатам расчета напряженно-деформированного состояния конструкции после третьей итерации.

Таблица 2

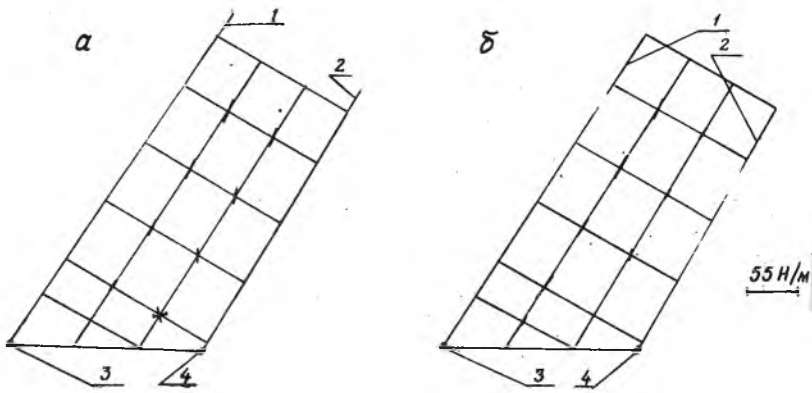
Усилия в стыке киля и фюзеляжа(действие киля на фюзеляж)

Схема	Случай нагружения	Узел	Усилие, *даН*		
			x	*y*	*z*
ПС	ЗЦД	I	58604	9I045	59I5
		2	43557	III663	7462
		3	-34I27	-59460	-I28I6
		4	-63I44	-I5285I	26873
	ПЦД	I	634I3	II4836	I650I
		2	23466	87925	-3367
		3	-4I425	-87633	329
		4	-40498	-I24760	I3993
КС	ЗЦД	I	806I8	I23032	II060
		2	39267	75944	8743
		3	-5462I	-9I404	-I3344
		4	-60306	-II7I35	2I0I5
	ПЦД	I	8989I	I43242	22783
		2	27269	56494	-3950
		3	-66608	-II5874	I603
		4	-45600	-93532	7035

Для обеих схем расположения силовых шпангоутов наибольшие усилия в конструкции киля возникают в правой панели в случае нагружения ЗЦД. Соответствующие ПГУ в конструкции киля показаны на рис.4.



Р и с.4. ПГУ в правой панели киля. Случай нагружения ЗЩД: а-схема ПС, б-схема КС-I-оси лонжеронов;2-стыковые узлы; —•— - растяжение; ⊢—⊣ сжатие



Р и с.5. ПГУ в правой панели киля. Случай нагружения ПЩД: а-схема ПС, б-схема КС - I,2-оси лонжеронов; 3,4-стыковые узлы; —•— -растяжение; ⊢—⊣ - сжатие

В обеих схемах ПГУ в основном близки, особенно по их ориентации. Для узлов, расположенных по передней линии сетки, характерно наличие большого растягивающего потока и значительно меньшего по величине потока сжимающих сил. Напряженное состояние панели в этой зоне близко к одноосному. По задней линии сетки в схеме ПС также преобладает растягивающий поток усилий с почти такой же ориентацией, как и по передней линии. В схеме КС в этой зоне действует поток сжимающих усилий, примерно равный по величине растягивающему потоку. Панель в этой зоне находится в условиях, близких к чистому сдвигу. Такова же картина ПГУ в левой панели с той разницей, что в ней преобладают сжимающие усилия.

В случае ПЦД вся панель, за исключением зоны около корня заднего лонжерона, находится в практически одноосном поле усилий см.рис.5. Следует обратить внимание на отличия направлений ПГУ в этом случае в схемах ПС и КС.

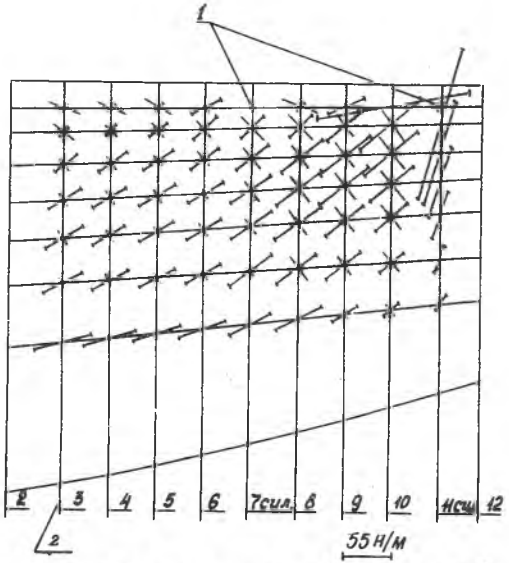
Отмеченные особенности в распределении ПГУ в панелях киля указывают на зависимость силовой работы киля от расположения силовых шпангоутов фюзеляжа. Действительно, из таблицы 2 видно, что наибольшие усилия в стыке киля с фюзеляжем в обоих случаях нагружения действуют в схеме ПС по заднему лонжерону, а в схеме КС - по переднему. Особенно велика разница в усилиях по оси Y, характеризующих главным образом передачу с киля на фюзеляж изгибающего момента M_x.

Распределение этих усилий в схеме ПС согласуется с традиционными представлениями о работе на изгиб стреловидного киля с характерной концентрацией усилий около заднего лонжерона в корневой части. Эта концентрация больше в случае ЗЦД, что соответствует распределению нагрузки по хорде вертикального оперения.

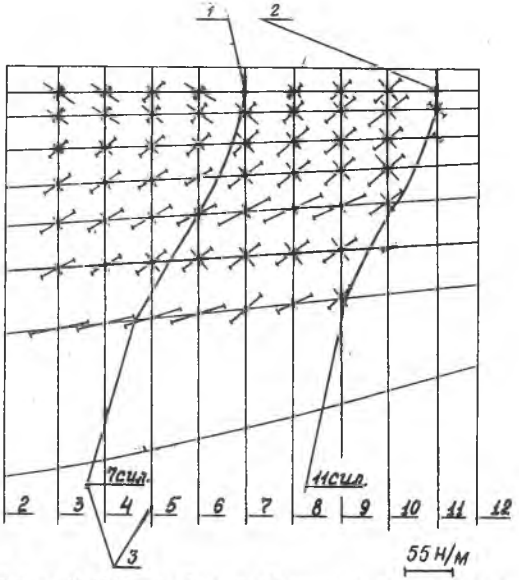
Концентрация усилий около переднего лонжерона в корневой части киля в схеме КС объясняется относительно большей жесткостью опоры переднего лонжерона, которой является наклонный силовой шпангоут 7 сил.(см. рис.I), по сравнению с опорой заднего лонжерона(наклонный шпангоут II сил.). Большая жесткость переднего силового шпангоута обеспечивается как его формой и размерами, так и более близким расположением к местам уравновешивания всех внешних нагрузок(т.е. к шпангоуту I).

Подчеркнем, что такой характер распределения усилий в стыковых узлах наблюдался на всех трех итерациях, т.е. при различном распределении материала в конструкции.

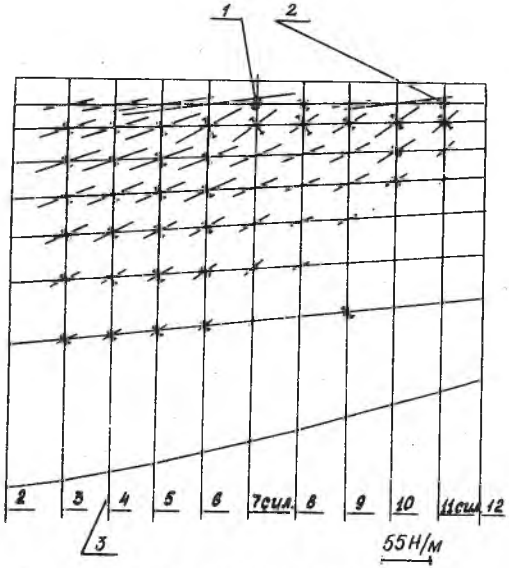
На рис.6-9 представлены ПГУ в обшивке фюзеляжа(на развертке)



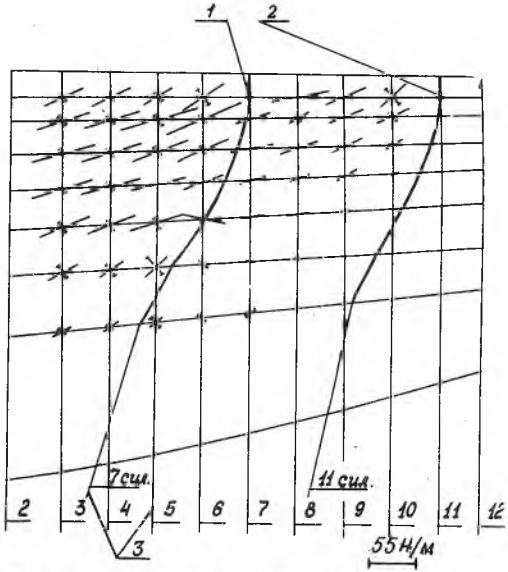
Р и с.6. ПГУ в обшивке фюзеляжа для случая нагружения ЗЩ.Схема ПС.Левый борт: I-стыковые узлы; 2- оси шангоутов; —— – растяжение; – – – – сжатие



Р и с.7.ПГУ в обшивке фюзеляжа для случая нагружения ЗЩ.Схема КС.Левый борт:I,2-стыковые узлы;3- оси шангоутов; —— –растяжение; – – – – сжатие



Р и с.8. ПГУ в обшивке фюзеляжа для случая нагружения ЗЦ.Схема ПС.Правый борт: I,2-стыковые узлы;3-оси шпангоутов; —— растяжение; —— сжатие



Р и с.9. ПГУ в обшивке фюзеляжа для случая нагружения ЗЦ.Схема КС.Правый борт: I,2-стыковые узлы;3-оси шпангоутов; —— растяжение; —— сжатие

с " размазанными " стержневыми элементами для случая нагружения ЗЦД. Он является определяющим для большинства элементов конструкции фюзеляжа.

Прежде всего отметим, что ПГУ в зоне около крайних шпангоутов I-3 в обеих схемах практически одинаковы. Это подтверждает предположение о том, что расположение силовых шпангоутов не оказывает влияния на напряженно-деформированное состояние фюзеляжа в этой зоне.

Не обсуждая подробно общей картины распределения усилий в конструкции фюзеляжа, заметим, что она вполне соответствует сложной системе внешних нагрузок, действующих на хвостовую часть самолета.

Характерно, что для большей части обшивки напряженное состояние по левому борту существенно двухосное, а по правому - ближе к одноосному растяжению.

Наибольшие отличия в силовой работе фюзеляжа в схемах ПС и КС наблюдаются в зоне между силовыми шпангоутами, а также перед шпангоутом 7 сил. Работа этой зоны определяется передачей силовыми шпангоутами усилий от стыковых узлов киля на обшивку фюзеляжа. По левому борту обшивка в обеих схемах работает в основном на сдвиг (см. рис. 6,7). В схеме ПС потоки усилий в обшивке между силовыми шпангоутами значительно больше, поскольку в этой схеме больше нагружен задний лонжерон киля и соответствующий шпангоут II сил. фюзеляжа. В схеме КС в этом случае нагружения усилия между лонжеронами киля распределяются более равномерно, что и приводит к уменьшению потоков усилий в обшивке. Обшивка правого борта в этой зоне больше нагружена также в схеме ПС (см. рис. 8,9).

Большие составляющие усилий в стыке, направленные вдоль оси X, в схеме с прямыми шпангоутами воспринимаются стержневыми элементами фюзеляжа, проходящими через стыковые узлы.

В схеме КС излома силовых элементов в стыке нет, все компоненты усилий воспринимаются наклонными силовыми шпангоутами и более равномерно передаются на обшивку фюзеляжа. Это хорошо видно по картинам ПГУ.

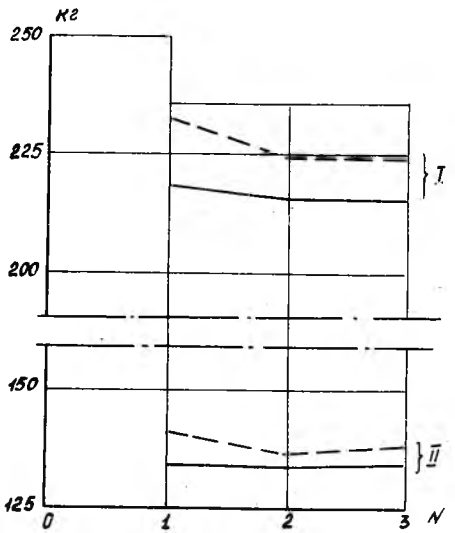
Сравнение весовой эффективности силовых схем достаточно просто можно сделать по значению массы условно равнопрочной конструкции, т.е. конструкции, получаемой из заданной изменением площади поперечного сечения каждого ее элемента по условию прочности в этом элементе [3] .

В то же время хорошо известно, что при нескольких случаях

нагружения равнопрочные конструкции могут не быть конструкциями минимальной массы (объема). В обсуждаемых в литературе примерах разница достигает 7% [4] .

Более определенную оценку можно сделать по значению потребной массы конструкции, т.е. массы конструкции, получаемой из заданной пропорциональным изменением площадей поперечных сечений всех ее элементов по условию прочности в наиболее нагруженном элементе.

На рис.10 показано изменение по итерациям массы условно равнопрочной конструкции хвостовой части самолета в целом и отдельно фюзеляжа для обоих вариантов силовой схемы. Из рисунка видно, что масса условно равнопрочной конструкции для варианта КС больше, чем для варианта ПС. После третьей итерации разница составляет около 4% для хвостовой части в целом и 2% для фюзеляжа.



Р и с.10. Масса условно равнопрочной конструкции:I- хвостовой части самолета;II-фюзеляжа;--- для схемы КС; ——для схемы ПС

Интересно отметить, что значения массы условно равнопрочной конструкции для обеих схем практически стабилизировались уже после второй итерации, в то время как конструкция существенно неравнопрочна.

В таблице 3 приведены значения потребной массы для конструкции в целом, а также отдельно для фюзеляжа и киля.

Таблица 3

Потребная масса конструкции

Схема	№ итерации	масса, кг		
		киль	фюзеляж	хвостовая часть самолета
ПС	I	I95	3I0	505
	2	I60	260	420
КС	I	264	407	67I
	2	I66	256	422

Примечание. Значения масс приведены для половины конструкции.

Из таблицы видно, что после первой итерации потребная масса всей конструкции для варианта КС на I66 кг больше, чем для варианта ПС, а после второй итерации – на 2 кг.

Для конструкции киля эта разница составляет соответственно 69кг и 6 кг. Замечательно, что потребная масса фюзеляжа для варианта КС после первой итерации была на 97 кг больше, чем для варианта ПС, а после второй итерации – на 4 кг меньше.

Приведенные результаты показывают, что по весовой эффективности оба варианта силовой схемы близки. Для окончательного выбора лучшего варианта необходимо продолжить отыскание равнопрочного распределения материала в конструкции, наблюдая при этом за изменением потребной массы.

Замечание. Опыт авторов, накопленный при выполнении расчетов и оптимизации большого числа разнообразных конструкций, дает основания предполагать, что на последующих итерациях сохранится более быстрое уменьшение потребной массы конструкции для варианта КС, и в итоге он может оказаться более эффективным.

Выводы

1. Расположение силовых шпангоутов существенно влияет на распределение усилий в корневой части киля и силовую работу хвостовой части фюзеляжа.

2. В конструкции с прямыми шпангоутами больше нагружен задний лонжерон киля, с наклонными шпангоутами - передний.

3. В конструкции с наклонными шпангоутами усилия с киля передаются на фюзеляж более равномерно, обшивка фюзеляжа в зоне расположения силовых шпангоутов нагружена меньше.

4. По весовой эффективности оба варианта расположения силовых шпангоутов для данной конструкции являются близкими.

Литература

1. Комаров В.А. О рациональных силовых конструкциях крыльев малого удлинения. Труды КуАИ, вып.32.-Куйбышев: КуАИ, 1968, с.6-26.

2. Комаров В.А., Пересыпкин В.П. Комплекс программ расчета авиационных конструкций ПРАСАК.-В сб.: Автоматизация проектирования авиационных конструкций.-Куйбышев, КуАИ, 1979, с.3-18.

3. Комаров В.А. Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций.-Дис.на соиск.учен.степени докт.техн. наук. Куйбышев, 1974, с.329.

4. Козлов Д.М. Сравнение некоторых результатов проектирования ферм минимального объема.- В сб.: Оптимальное проектирование авиационных конструкций. Куйбышев, КуАИ, 1973, вып.1, с.76-85.