

## ПРОЕКТИРОВОЧНАЯ МОДЕЛЬ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ФЮЗЕЛЯЖА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

Непременным атрибутом любой задачи оптимального проектирования несущей конструкции является выбор проектировочной модели (П-модели, ПМ). *Проектировочная модель - это описание структуры искомого объекта (в нашем случае несущей конструкции) в задаче оптимального проектирования, его видовых отличий.* Упрощенное описание несущей конструкции содержит также *расчетная модель* (Р-модель, РМ), но в РМ оно дополняется гипотезами о восприятии конструкцией внешних воздействий. В строительной механике РМ обычно называют расчетной схемой. Если описание несущей конструкции в Р-модели совпадает или близко к таковому в П-модели, то РМ можно назвать *согласованной* с ПМ.

В большинстве работ Р-модель согласована с П-моделью. Например, во многих случаях и проектировочной, и расчетной моделью являются: 1) балка; 2) стержневая система конкретного типа; 3) композиция конкретных конечных элементов; 4) перекрестно ребренная панель; 5) стрингерно-шпангоутная цилиндрическая оболочка. Только в ПМ перечисленные объекты выступают как тип несущей конструкции, а в РМ – как разновидность расчетной схемы.

Однако в общем случае эти модели не согласованы друг с другом, иногда весьма существенно. В первую очередь это имеет место в системных методах оптимизации несущих конструкций, где обычно применяют не менее двух П-моделей. На уровне системы РМ чаще всего является несогласованной с ПМ, на уровне элементов - согласованной.

Проектировочные модели можно подразделить на *естественные* и *абстрактные*. В естественных ПМ несущая конструкция описывается естественным образом, физически узнаваемо. В абстрактных моделях объект описывается либо очень обще, либо вообще не похоже на свой физический прототип. Абстрактные ПМ применяют на начальных этапах проектирования, когда при выборе конструктивно-силовой схемы нужно охватить как можно большее множество таковых.

Примерами *абстрактных* П-моделей является трехслойная модель, предложенная В.А. Комаровым [1], и дискретная модель Эбнера - Беляева, используемая в работе [2] в качестве как проектировочной, так и расчетной. *Естественными* П-моделями являются «базовый вариант несущей конструкции», «формализованный прототип», описание которых дано в [3], композиция конечных элементов. Работ по использованию последней в качестве ПМ мало и практически все они посвящены крыльям (например, статьи Е.К. Липина).

Вопросы выбора П-моделей при оптимизации тонкостенных несущих

щих конструкций (ТСНК) в литературе рассмотрены недостаточно. Одним из исключений является статья [3], в которой выполнен системный анализ по увязке структуры задач оптимизации ТСНК с этапным процессом реального проектирования авиаконструкций [4].

Оптимизации фюзеляжей посвящено на порядок меньше работ по сравнению с крыльями. Про фюзеляжные ПМ нечего и говорить.

Важно не только сконструировать П-модель, но и убедиться в ее адекватности. Для этого нужно создать *программные средства*, которые используют как эту ПМ, так и надлежащие методики проверочных расчетов и сходящийся оптимизационный процесс, а затем применить эти пакеты программ к натурным авиаконструкциям с анализом результатов. Реализация такого подхода для ПМ фюзеляжа пассажирского самолета (ФПС) описана в данной статье. О других подобных работах ее авторам неизвестно. Кроме того, неизвестны работы, где бы так подробно и аргументировано излагалось построение ПМ и РМ в задачах оптимизации ТСНК.

### **Описание проектировочной модели ФПС**

Проектировочная модель приближенно аппроксимирует упрощенный вариант проектируемой несущей конструкции (сокращенно УНК). Убраны все несилловые элементы. От фюзеляжа условно отсоединены прикрепляемые к нему другие агрегаты самолета (крыло, оперение, шасси, двигатели). Большинство резких изломов внешней поверхности сглажены. Низинки рядовых и силовых шпангоутов, если они имеются, заменены горизонтальными балками-перемычками и небольшим числом вертикальных стоек. Устранены наклонные шпангоуты, идущие от узлов крепления киля (если таковые имеются) - их функции выполняют оставшиеся шпангоуты, перпендикулярные оси фюзеляжа. Так же поступаем с продольными сосредоточенными элементами, которые для ФПС не играют существенной роли в восприятии оболочкой общего изгиба и кручения.

Из силовых шпангоутов (СШ) остаются только главные. Это СШ, к которым приложены реакции: 1) от стоек шасси и их подкосов; 2) от узлов крепления крыла; 3) от узлов крепления оперения; 4) от двигателей, крепящихся к фюзеляжу.

Описанная УНК подвергается дальнейшим упрощениям и регуляризации. Отсоединяются носовая часть до первого шпангоута и хвостовая часть, примыкающая к последнему шпангоуту, которые называются законцовками. Конструктивно-технологические исполнения шпангоутов представляются упрощенно.

Схематизируются узлы крепления к фюзеляжу крыла, оперения, шасси, двигателей. Эти агрегаты считаются присоединенными с помощью небольшого числа невесомых опор, присоединяемых только к силовым шпангоутам. Так, присоединение крыла моделируется совокупно-

стью шарнирных опор, расположенных в местах пересечения бортовых нервюр с лонжеронами.

Условно отброшены многочисленные элементы ниш шасси, крепления центроплана к силовым шпангоутам. Убраны технологические стыки. Для масс этих элементов используется статистика. Она же применяется при оценке масс малых вырезов под иллюминаторы, технологические и смотровые лючки, малые аварийные люки.

Вырезы в местах прохождения центроплана через фюзеляж, крепления носовой стойки шасси заменены условными перекрестно ребренными панелями. То же сделано с вырезами под двери, багажные и аварийные люки, относящимися к вырезам средних размеров, а также большими вырезами, если таковые имеются. Аналогичная замена осуществлена для остекления кабины пилотов. Полное устранение из ПМ вырезов является обоснованным приемом для малых и средних и приближенным приемом для больших вырезов. После сходимости итераций поискового метода полученные результаты корректируются с учетом наличия вырезов [5].

Гермошпангоуты и стеночные шпангоуты рассматриваются как балочные шпангоуты с очень большими моментами инерции сечений. Массы гермошпангоутов определяются из приближенных соотношений.

Стрингеры и шпангоуты при взаимных пересечениях считаем сплошными, крепление их к обшивке - непрерывным.

Считается, что двери всех входов в фюзеляж, крышки люков и лючков, полы пассажирского салона, багажных отделений, пилотской кабины не участвуют в восприятии общего изгиба и кручения. Данные элементы не присутствуют в ПМ – их массы оцениваются с помощью статистики.

Участки оболочки с высокой нерегулярностью набора заменены регулярно ребренными участками. Различия в массах таких участков, вызванные заменой, учитываются статистически.

Рядовые шпангоуты (РШ) могут иметь разные топологии на разных участках фюзеляжа. Всего предусмотрено четыре типа топологии, показанные на рис. 1. В пределах любого отсека топологии всех РШ принимаются одинаковыми (понятие отсека пояснено ниже).

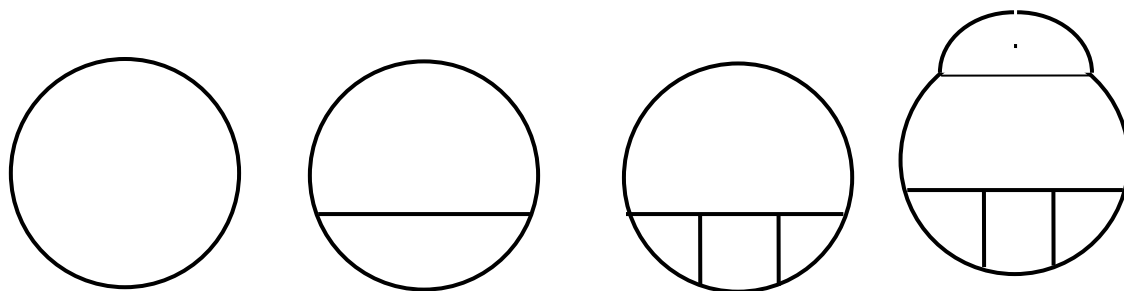


Рисунок 1 - Возможные типы топологии шпангоутов

Сечения ободов всех РШ считаются постоянными и одинаковыми. Такими же предполагаются сечения всех перемычек и сечения всех стоек РШ. Поэтому несмотря на возможные отличия в топологии для РШ требуется подобрать всего три сечения.

Высоты сечений ободов и перемычек силовых шпангоутов вдоль осевых линий могут быть переменными. Сечения каждой стойки СШ постоянны.

Первый и последний шпангоуты ПМ обязательно являются силовыми, что определяется предложенными в [6] интерпретацией дискретной модели и способом формирования РМ (иначе последняя не имела бы по торцам шпангоутов).

Панели могут иметь продольные подкрепления шести типов, показанных на рис. 2 (этот список, соответствующий учебному пособию [7], можно расширить). Здесь ПР-100 - угольник равнобокий, ПР-101 - угольник разностенный, ПР-102 - бульбоугольник, ПР-105 - зет нормальный, ПР-111 - угольник разностенный, ПР-112 - бульбоугольник стрингерный.

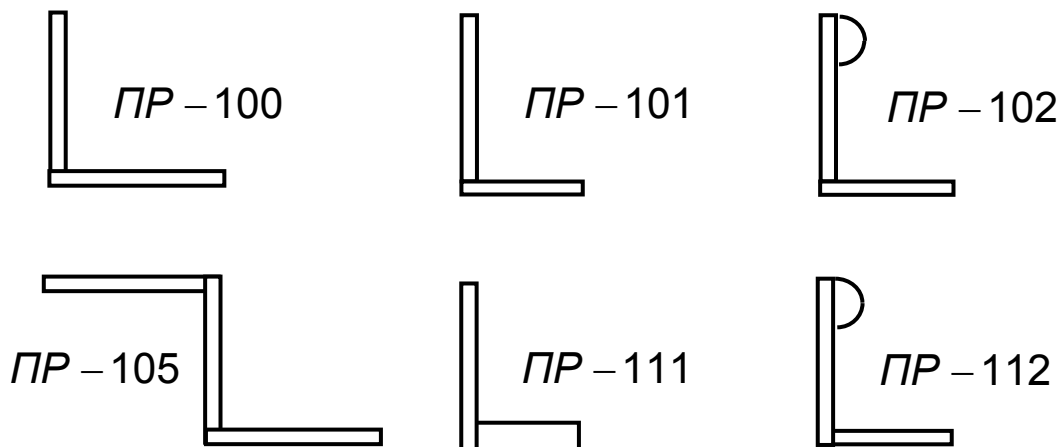


Рисунок 2 - Предусмотренные типы продольных подкреплений

Для каждого типа стрингера имеется «свое» значение коэффициента  $K_x$  в соотношении [8]

$$F_{x\cup} = K_x \delta_{обш},$$

где  $F_{x\cup}$  - минимально допустимое значение площади сечения стрингера;  $\delta_{обш}$  - толщина обшивки соответствующей панели. Панели считаются клепаными: для лапки стрингера должно выполняться условие

$$\delta_{лапки стр} = (1,2...2) \delta_{обш},$$

где  $\delta_{лапки стр}$  - толщина лапки стрингера.

Способ определения коэффициентов  $K_x$  для различных типов продольных подкреплений описан в работе [8]. В ней же приведены зна-

чения этой величины для показанных на рис. 2 типов стрингеров.

Полученный объект и представляет собой *П-модель ФПС*.

### **Декомпозиция проектировочной модели**

Следуя [6], изложим способ расчленения ПМ на крупные подструктуры. Ввиду высокой регулярности П-модель представима совокупностью небольшого числа крупных конечных элементов (КЭ). Разбиение на КЭ проводится так:

1) в поперечном направлении ПМ разбивается на участки, называемые отсеками, и силовые шпангоуты (рис. 3). Каждый отсек должен содержать хотя бы один рядовой шпангоут. Все РШ любого отсека являются равноудаленными. Членение выполняем плоскостями, перпендикулярными оси фюзеляжа. Разграничение соседних отсеков выполняется по обшивке между рядовыми шпангоутами, разграничение отсека и СШ - по границе последнего;

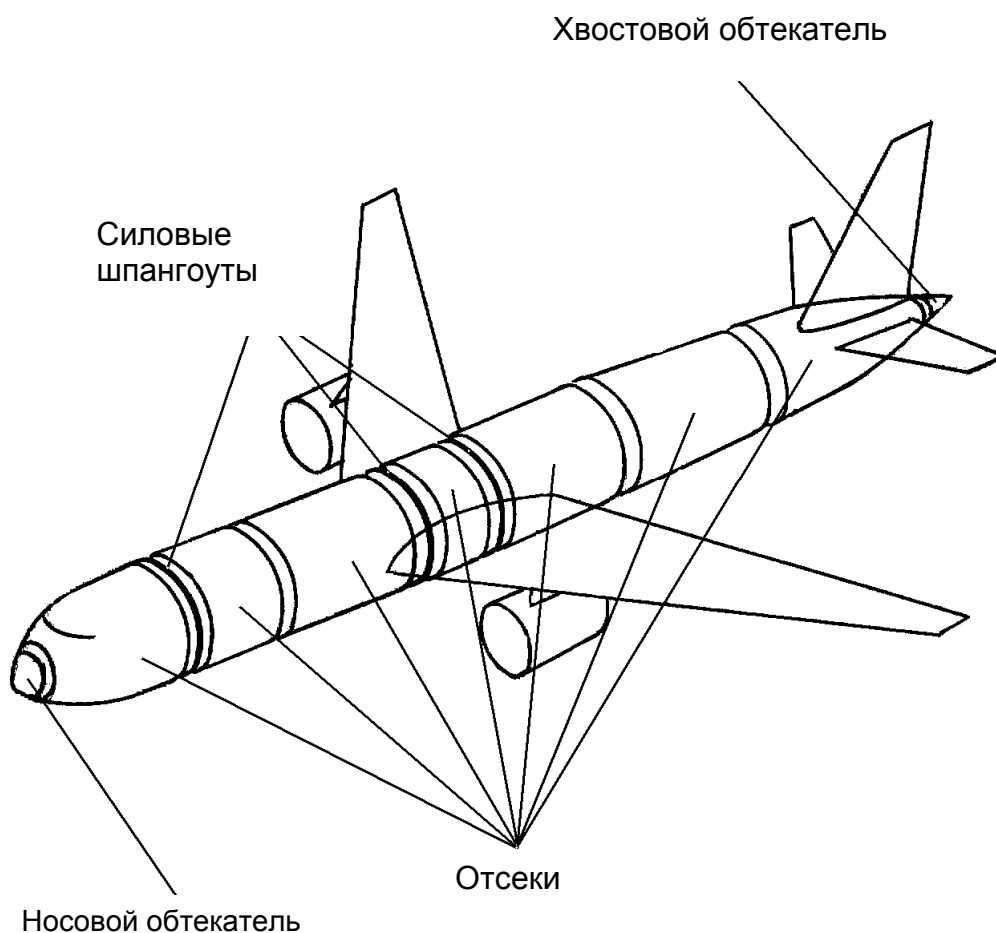


Рисунок 3 - Членение упрощённой несущей конструкции фюзеляжа

2) в продольном направлении периферия (оболочка) ПМ разбивается на ряд полос, названных *х-полосами*, по длине каждой из которых количество (не менее одного) стрингеров неизменно. Стрингеры любой *х-полосы* равноудалены. Границы *х-полос* проходят по обшивке между

стрингерами. Размещение х-полос симметрично относительно плоскости симметрии самолета.

Проектировочная модель оказывается расчлененной на крупные КЭ следующих типов: 1) перекрестно ребренные панели; 2) балочные КЭ силовых шпангоутов; 3) стойки СШ; 4) группы балочных КЭ перемычек рядовых шпангоутов; 5) группы стоек РШ. Конечные элементы второго типа образованы пересечениями х-полос с ободами силовых шпангоутов, а также делением перемычек СШ на отдельные элементы. На перемычке КЭ расположены симметрично.

Каждый КЭ четвертого типа представляет собой совокупность балочных элементов, принадлежащих перемычкам РШ одного отсека и взятых по одному для каждого РШ. Объединяются в КЭ четвертого типа элементы, расположенные на своих шпангоутах идентично. Расположение этих КЭ должно быть симметричным относительно плоскости симметрии самолета. Перемычки РШ и СШ следует делить на одинаковое число элементов (для СШ это КЭ второго типа).

Каждый КЭ третьего типа – это одна стойка СШ. Конечные элементы пятого типа образуются аналогично КЭ четвертого типа, но из стоек РШ одного отсека. Стойки дополнительно на элементы не делятся.

Теперь по правилам, изложенным в [6], можно построить дискретную Р-модель, которая является *несогласованной* с П-моделью. Приведенная в [6] интерпретация этой ПМ позволяет организовать оптимизационный процесс, имеющий характер последовательных приближений.

### **Адекватность проектировочной модели. Выводы**

Описываемая ПМ реализована при разработке интегрированного программного средства ЭСПРАНК-5, ориентированного на формирование массы ФПС [5]. Оказалось, что эту ПМ можно также применить для надднщевых частей фюзеляжей гидросамолетов (ФГС), что позволило использовать ее в программном средстве ЭСПРАНК-6, предназначенном для формирования массы ФГС [9].

Упомянутые комплексы программ были проверены при формировании массы более десяти фюзеляжей натуральных пассажирских самолетов семейств Ан, Ту, Ил, Як и пяти натуральных гидросамолетов. Во всех случаях отличия результатов расчетов по сравнению с реальными массами были приемлемыми, не возникало трудностей с подготовкой исходных данных.

Комплексы и их предыдущие версии использовались на стадиях эскизного проектирования воздушных судов Ан-180 и Ан-218, которые остались нереализованными в металле, а также Ан-140 и Бе-103. Оказались полезными программные средства также при расчетах массы модификаций типа вставок в фюзеляж.

Предложенная П-модель является *естественной*, адекватной для несущих конструкций ФПС и надднщевых частей ФГС. Она хорошо соответствует структуре этих объектов и может быть использована на этапе эскизного проектирования.

## Список использованных источников

1. Комаров В.А. О рациональных силовых конструкциях крыльев малого удлинения / В.А. Комаров // Проектирование оптимальных конструкций: сб. науч. тр. КуАИ. – Вып. 32. – Куйбышев: КуАИ, 1968. – С. 6 – 26.
2. Бабенко Л. Д. Методика проектировочных расчетов силовых конструкций с использованием метода сил / Л. Д. Бабенко, М. П. Тепеницын // Тр. ЦАГИ. – Вып. 2476. – М.: ЦАГИ, 1991. – С. 82 – 88.
3. Рябченко В.М. Обоснование потребности в крупноэлементных сдвигово-клеточно-стержневых дискретных моделях тонкостенных конструкций / В.М. Рябченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4. – Х., 1999. – С. 143 - 149.
4. Проектирование самолетов: учеб. для вузов / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисейцев и др.; Мин-во высш. и средн. спец. образования СССР; под ред. С. М. Егера. - М.: Машиностроение, 1983. - 616 с.
5. Лавриненко В.А. Развитие интегрированного программного средства формирования массы фюзеляжа пассажирского самолета / В. А. Лавриненко, В. Д. Первак, В.М. Рябченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5. – Х., 1999. – С. 106 – 110.
6. Рябченко В. М. Интерпретация дискретной модели тонкостенной несущей конструкции, увязанная с оптимизационным процессом / В.М. Рябченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (64). - Х., 2010. – С. 83 - 91.
7. Евсеев Л. А. Расчет на прочность крыла большого удлинения: учеб. пособие / Л.А. Евсеев; Мин-во высш. и средн. спец. образования СССР. – Х.: ХАИ, 1985. – 106 с.
8. Рябченко В. М. О рядовых продольных подкреплениях при оптимизации фюзеляжных несущих конструкций / В.М. Рябченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(51). – Х., 2007. – С. 26-36.
9. Лавриненко В. А. Интегрированное программное средство формирования массы фюзеляжа гидросамолета / В.А. Лавриненко, В. Д. Первак, В.М. Рябченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 6. – С. 44 – 48.

*Поступила в редакцию 19.03.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*