

*А.В. Болдырев, к.т.н, В.А. Комаров, д.т.н (Самарский государственный аэрокосмический университет (Национальный исследовательский университет), Россия)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТИ В ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧАХ**

*Предлагается технология выбора силовой схемы и весового анализа конструкций с использованием специальной модели метода конечных элементов. Технология учитывает требования прочности, жесткости и устойчивости объектов, а также влияние их деформаций на аэродинамические нагрузки. Приводятся результаты решения ряда модельных и практических задач.*

Рассматриваются следующие взаимосвязанные задачи, решаемые на ранних стадиях проектирования летательных аппаратов:

- определяются нагрузки, действующие на конструкцию;
- выбираются наиболее эффективные по массе силовые схемы;
- определяются (прогнозируются) значения масс агрегатов.

Эти задачи приходится решать в условиях неопределенности, когда отсутствует необходимая информация об объекте проектирования, в частности, еще не известны деформации создаваемой конструкции. При этом обычно используются специфические для каждой задачи математические модели и данные о прототипах проектируемого изделия.

В сложившемся порядке проектирования самолетов на ранних этапах *задача определения нагрузок*, как правило, решается в предположении абсолютной жесткости конструкций. В то же время известно, что изгибные деформации, например, стреловидного крыла вызывают отрицательные изменения углов атаки в концевых сечениях крыла. Учет этих изменений может дать другое, более выгодное с точки зрения прочности, распределение нагрузки и соответствующее снижение массы конструкции. Для этого необходим достоверный прогноз переменных состояния разрабатываемых упругих систем.

*Силовая схема* конструкции определяется типом силовых элементов, их числом, расположением в пространстве и способами соединения между собой. Решения, связанные с выбором силовых схем, на практике зачастую принимаются эвристическими методами, на основании опыта и интуиции, а также с использованием результатов расчетов на упрощенных математических моделях. Более достоверное исследование свойств объекта проектирования с применением метода конечных элементов (МКЭ) при этом производится лишь в конце процесса его разработки на стадии проведения поверочных расчетов. С целью повышения качества проектов в работе [1] предложена технология формирования силовой схемы по условиям прочности с привлечением МКЭ еще до начала полномасштабной разработки конструкции на этапе рабочего проектирования.

*Весовое проектирование* конструкций часто основывается на использовании так называемых "весовых формул", получаемых из статистического анализа построенных самолетов и использующих упрощенную балочную теорию. В работе [2] предложен подход к весовому проектированию авиационных конструкций на основе конечно-элементных моделей и специфического критерия – силового фактора.

Современные авиационные конструкции традиционных форм близки к исчерпанию своих аэродинамических и весовых характеристик, поэтому во всем мире ведется интенсивный поиск новых технических решений. Характерными примерами результатов такого поиска могут служить телескопические крылья, самолеты интегральной компоновки, крылья малого удлинения необычной формы, исследования, направленные на поиск рациональных подкреплений тонкостенных конструкций в зонах больших вырезов и другие инновационные работы для которых еще не накоплены статистические данные, достаточные для использования традиционных методик проектирования.

Все это свидетельствует, во-первых, о *противоречии* между существующими способами проектирования и потребностью внедрения в конструкцию летательных аппаратов новых технических решений и, во-вторых, об *актуальности* вопроса разработки методики, использующей высокоточное математическое моделирование уже на этапе эскизного проектирования авиационных конструкций.

В настоящем исследовании предлагается развитие технологии проектирования [1,2], позволяющее решать указанные задачи на основе специальной модели МКЭ. На стадии эскизного проектирования конструкции еще не известны основные параметры сечений силовых элементов, которые определяются в процессе дальнейшей проработки объекта. В этих условиях для обоснованного выбора силовой схемы конструкции с учетом ограничений на эквивалентные напряжения, обобщенные перемещения и значения критических нагрузок, приводящих к выпучиванию упругой системы, может быть использована гипотетическая упругая среда переменной плотности, вписанная в геометрические ограничения разрабатываемого объекта.

Идея применения в процессе проектирования силовых конструкций материала с переменной по объему плотностью и жесткостью имеет четкий отечественный приоритет [3, 1]. Эта идея несколько позже [4, 5] использована в исследованиях зарубежных ученых в виде пористого специфического материала с переменными прочностными и упругими свойствами.

В настоящей работе используется материал [3, 1], для которого модуль упругости и прочностные характеристики пропорциональны плотности  $\rho$ :

$$E = \rho \underline{E}, \quad (1)$$

$$[\sigma] = \rho [\underline{\sigma}], \quad (2)$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение материала;  $\underline{E}$  и  $[\underline{\sigma}]$  – модуль упругости и допускаемое напряжение при единичной плотности.

Допустимая область объемом  $V$ , внутри которой может размещаться проектируемая конструкция, разбивается на  $n$  достаточно малых трехмерных конечных элементов. Непрерывная упругая среда со свойствами (1)-(2) (континуальная модель) потенциально содержит внутри заданных геометрических ограничений все мыслимые силовые схемы конструкции, которые могут быть образованы сгустками материала переменной плотности. Оптимизация распределения материала в континуальной модели позволяет определить проект, которому соответствует рациональная с точки зрения передачи усилий силовая схема конструкции.

Рассмотрена следующая оптимизационная задача. Минимизируется масса упругой среды при функциональных ограничениях на эквивалентные напряжения, обобщенные перемещения и критические усилия потери устойчивости. За проектные переменные принимается плотность материала в трехмерных конечных элементах.

В работе [1] обоснован выбор приближенного алгоритма решения этой задачи с использованием концепции полнонапряженности. В [6] предложен алгоритм решения задачи оптимизации с учетом ограничений по прочности и жесткости. Движение в области поиска осуществляется на основе последовательного чередования "пробных" и "рабочих" шагов. На этапе "пробных" шагов определяются значения проектных переменных на основе линейных аппроксимаций функциональных ограничений. "Рабочий" шаг характерен тем, что для него выполняется анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкции в полном объеме. В работе [7] этот подход дополнен учетом ограничений на значения критических нагрузок, приводящих к потере устойчивости упругой системы.

Алгоритмы [1,6,7] реализованы на языке Visual Basic for Applications в среде прикладного программного интерфейса МКЭ-системы NASTRAN. Для испытания работоспособности алгоритма и программного обеспечения проведено исследование на специально подобранных тестовых задачах, показавшее удовлетворительную сходимость

алгоритма. Для практических целей оказалось достаточно 10 – 30 "рабочих" шагов алгоритма.

В качестве примера приведем результаты оптимизации центрально сжатых стержней, полученные с учетом ограничений на напряжения и критические усилия потери устойчивости. На рис. 1 показано распределение материала в срединном поперечном сечении стержней для двух вариантов допустимой геометрической области – цилиндрической и призматической.

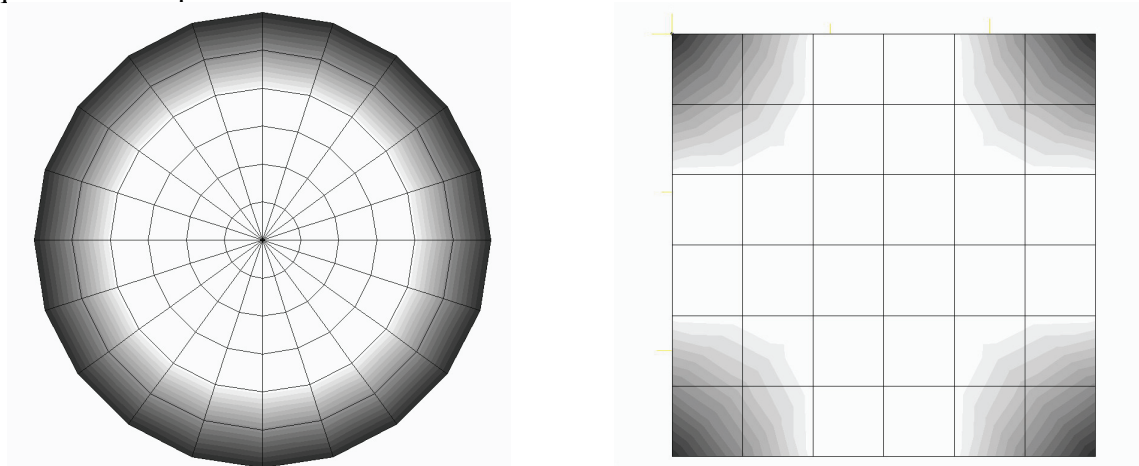


Рис. 1. Распределение плотности в сжатых стержнях

Анализ распределения материала и основных путей передачи сил в теоретически оптимальной континуальной конструкции, полученных по алгоритмам [1,6,7], позволяет, во-первых, разработать варианты рациональных силовых схем с использованием стратегии [1], во-вторых, спрогнозировать массу конструкции на основе подхода [2] с учетом статической аэроупругости [8,9], а также широкого спектра функциональных ограничений и конструктивно-технологических требований.

В настоящей работе рассматриваются задачи проектирования стреловидных крыльев, несущих поверхностей малого удлинения [10], в том числе круглого в плане крыла, фюзеляжей в зоне больших вырезов. На рис. 2 представлено распределение плотности в крыльях малого удлинения различной формы в плане. Все эти крылья имеют одинаковые значения относительного удлинения и площади в плане. Для несущих поверхностей используется симметричный профиль NACA0012 с относительной толщиной 12%.

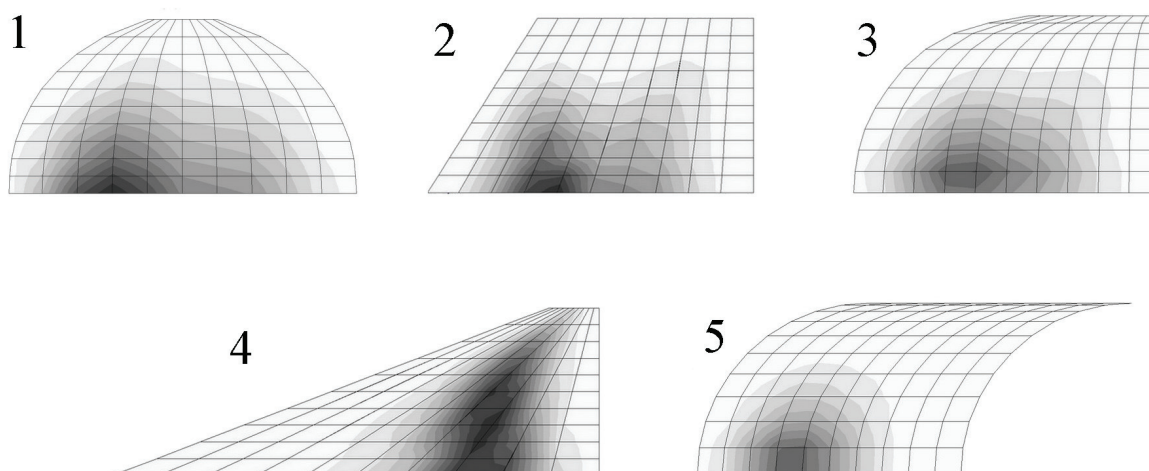


Рис. 2. Распределение материала в теоретически оптимальных крыльях

При проектировании стреловидного крыла удалось выявить дополнительные элементы и места их расположения [11], позволяющие уменьшить угол закручивания концевой сечения крыла на 32% при увеличении массы полнонапряженной конструкции на 2%.

Исследования на континуальной модели отсека фюзеляжа с прямоугольным вырезом позволили выявить новое техническое решение, для которого теоретически необходимая масса материала для компенсации выреза на 14% меньше, чем для традиционного варианта силовой схемы.

Вопросы адекватности континуальной модели рассмотрены в работе [12].

### Выводы

Идея модели переменной плотности использована в развитии технологии проектирования летательных аппаратов. Для обоснованного выбора рациональной силовой схемы и достоверной оценки массы разрабатываемой конструкции технология учитывает функциональные ограничения по прочности, жесткости и устойчивости, а также зависимость распределения аэродинамических нагрузок от деформаций упругой системы.

Виртуальные эксперименты с использованием континуальной модели переменной плотности позволяют эффективно решать рассматриваемые задачи на ранних стадиях проектирования летательных аппаратов. Опыт показывает, что трудоемкость создания трехмерных континуальных моделей с использованием соответствующих генераторов сеток во много раз меньше, чем создание конечно-элементных моделей тонкостенных каркасированных авиационных конструкций с известными проблемами геометрической изменчивости.

Новая технология проектирования позволяет на ранних этапах разработки выявить и реализовать существенные резервы снижения массы авиационных конструкций.

### Список литературы

1. *Комаров В.А.* Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машиностроение, 1984. С.114-129.
  2. *Комаров В.А.* Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы // Полет. 2000. №1. С. 31-39.
  3. *Комаров А.А.* Основы проектирования силовых конструкций. Куйбышев: Куйбышевск. книж. изд-во, 1965. 82 с.
  4. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. V. 71. P. 197–224.
  5. Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. 2001. V. 54. № 4. P. 331-389.
  6. Болдырев А.В. Структурная оптимизация крыльев с учетом требований прочности и жесткости // Вестник МАИ. 2009, Т16, № 3, С. 15-21.
  7. Болдырев А.В. Развитие технологии проектирования авиационных конструкций на основе модели переменной плотности // Полет. 2009. № 11. С. 23-28.
  8. Болдырев А.В., Комаров В.А., Лаптева М.Ю., Попович К.Ф. Учет статической аэроупругости на ранних стадиях проектирования // Полет. 2008. № 1. С. 34–39.
  9. Болдырев А.В., Комаров В.А. Структурная оптимизация несущих поверхностей с учетом статической аэроупругости // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 2. С. 3-6.
  10. Болдырев А.В. Весовой анализ крыльев нетрадиционной конфигурации // Полет. 2009. № 10. С. 57-60.
  11. Болдырев А.В. Структурная модификация тонкостенных конструкций с учетом требований жесткости // Проблемы прочности и пластичности. 2008. Вып. 70. С. 175-183.
- Болдырев А.В., Комаров В.А., Лаптева М.Ю. Об оценке точности прогнозирования деформаций крыла на основе модели переменной плотности // Вестник КГТУ. 2009. № 3. С. 13-15.