

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД

© 2011 Ю. М. Темис, Д. А. Якушев

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Рассмотрена концепция использования методики оптимального проектирования для автоматизированного проектирования конструкции ГТД. Обсуждаются методы параметризации, выбор расчетных моделей и критериев оптимизации. Конструктивная оптимизация (оптимизация формы) применяется для оптимального проектирования лопатки и диска вентилятора. Результаты получены с помощью программного комплекса, состоящего из модуля анализа конструкции на основе метода конечных элементов и модуля оптимизации на основе алгоритма последовательной квадратичной аппроксимации.

*Оптимальное проектирование, диск, лопатка, вентиляторная ступень.*

### Введение

Конструкции современных ГТД создаются с помощью систем и средств автоматизированного проектирования. Процесс создания новой конструкции является итерационным и многостадийным, поэтому использование оптимального проектирования как одного из путей автоматизации может сократить трудоемкость проектирования. Применение методики оптимального проектирования позволяет найти наилучшую конструкцию, удовлетворяющую технологическим и прочностным ограничениям и обеспечивающую минимум заданной целевой функции [1,2].

### Общие принципы применения методов оптимизации

Выбор функции цели, критериев и ограничений является определяющим в постановке задачи оптимизации. В зависимости от назначения детали или конструкции необходимо рассматривать различные функции цели: минимум массы, максимум момента инерции, максимум жесткости и т.д. При оптимизации формы детали функция цели зависит от геометрических параметров проектирования, которые должны также удовлетворять ряду ограничений, накладываемых на эти параметры и на параметры состояния конструкции: размеры, напряжения, перемещения и др.

Ограничения задаются на основе критериев обеспечения технологичности, размещаемости деталей, несущей способности и т.д. Многорежимность работы двигателя и противоречивые требования, предъявляемые к конструкции, обуславливают необхо-

димость решать задачи многокритериальной оптимизации, используя принцип Парето или преобразуя многокритериальную задачу проектирования к однокритериальной задаче.

В задаче оптимизации формы детали необходимо создать параметризованную модель на основе геометрической формы детали или конструкции. Форма детали или конструкции задается вектором геометрических параметров, позволяющим построить замкнутую геометрическую модель детали. Выбранная параметризация должна соответствовать топологии определенного конструктивного решения. Для поиска принципиально новой топологии необходимо использовать методы топологической оптимизации.

Выбор управляемых параметров определяется целью проектирования и ограничениями. Например, добавление в параметры проектирования радиусов галтелей в дисках незначительно повлияет на оптимальные массу и жесткость конструкции, но существенно увеличит время решения задачи. Исключение из параметров радиусов скруглений, отверстий и других концентраторов напряжений приводит к расчетной схеме, в которой оценка ресурса проводится по упрощенным моделям, опирающимся на номинальное НДС детали. Вместе с тем добавление параметров галтелей, радиусов отверстий и других геометрических параметров концентраторов напряжений в процесс проектирования позволяет оценить НДС в концентраторах напряжений и использовать в качестве критериев ресурса уточненные мо-

дели долговечности, но приведет к увеличению времени решения задачи.

Выбор метода оптимизации зависит от способа задания параметров, размерности параметрического пространства, гладкости функций цели и ограничений, постоянного и переменного набора ограничений по итерациям и т.д. Как правило, время работы самого программного модуля оптимизации намного меньше времени работы расчетных программ на шаге изменения вектора параметров проектирования.

Для задач с непрерывными параметрами применяются методы глобальной или локальной аппроксимации. В первом случае используется информация во всем пространстве параметров. Для этого строится глобальная аппроксимация функций цели и ограничений на основе серии расчетов этих функций на некотором наборе точек из области. К полученным аппроксимациям можно применить различные методы оптимизации.

Методы локальной аппроксимации используют текущую информацию для точки и, возможно, с предыдущих итераций. На основании этой информации осуществляется переход к следующей точке. Если задача имеет несколько локальных оптимумов, то каждый из них будет иметь некоторую свою область притяжения, которая может иметь сложную структуру. В этом случае методы глобальной аппроксимации имеют некоторое преимущество, если найденная аппроксимация хорошо соответствует истинным функциям цели и ограничений. Хотя по-

строение глобальной аппроксимации требует существенно большего количества расчетов функций цели и ограничений, нахождение нескольких решений или множества Парето для многокритериальной задачи будет вестись без дополнительных вызовов внешней расчетной программы.

Оптимизация по одному режиму работы (даже самому нагруженному) может оказаться недостаточной, так как различные типы нагрузок могут усиливаться в одной зоне и компенсироваться в другой. В большинстве случаев оптимизация выполняется для одного наиболее тяжелого режима работы двигателя: оптимизация массы или жесткости дисков, проставок, опор, корпусов, лопаток компрессоров и турбин. Однако возможны варианты, когда оптимизация выполняется для наиболее продолжительного режима с целью обеспечения экономичности двигателя: оптимизация выносов лопаток для обеспечения в рабочих условиях заданных аэродинамических форм, оптимизация уплотнительных устройств для обеспечения минимальных зазоров между ротором и статором.

#### Программный комплекс оптимизации

Для решения задач оптимального проектирования конструктивных элементов ГТД применяется программный комплекс, состоящий из нескольких частей. Каждая часть, выполняющая собственные подзадачи, выделена в отдельный модуль. Для управления взаимодействием между модулями применяют специальную управляющую программу (рис.1).

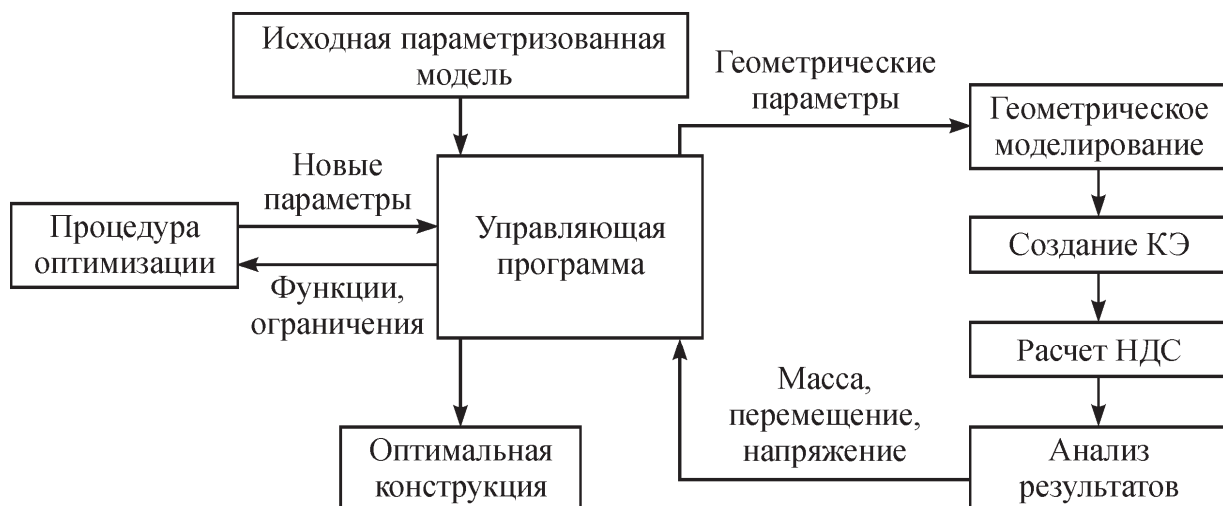


Рис. 1. Структура взаимодействия между модулями в задаче оптимизации формы и размеров конструкции

Программа передает управление в определенной последовательности каждому модулю, контролирует потоки информации между модулями построения геометрической модели, расчета и оптимизации. Она содержит средства диалогового общения и графического отображения, позволяет задавать исходные данные, оптимизируемые параметры, целевую функцию и ограничения, с помощью визуализации позволяет пользователю оценивать и оперативно вмешиваться в процесс оптимизации. Процедура оптимизации на основании функций цели и ограничений, а также их градиентов, модифицирует параметры в соответствии с заложенной стратегией поиска, обеспечивает выход из итерационного процесса при достижении оптимального решения. Благодаря модульной структуре оптимизационной программы возможно применение различных процедур оптимизации и программ расчета НДС. В качестве расчетного модуля можно использовать различные методы, например МКЭ или метод граничных элементов (МГЭ). Достаточно соблюдать правила обмена информацией между модулями через некоторый стандартный интерфейс в виде текстового файла. Параметризованная модель создается в виде текстового файла с набором параметрических команд. При выполнении этого командного файла производится: построение геометрической модели; построение конечно-элементной сетки; приложение нагрузок; расчет НДС; вывод результатов.

Программа расчета при изменении параметров производит обновление геометрической модели и расчет НДС измененной модели, по результатам которого формируется выходной отклик. Управляющая программа по полученному отклику осуществляет расчет функций цели и ограничений, которые передаются в процедуру оптимизации. Процедура оптимизации генерирует новые значения параметров. Управляющая программа модифицирует командный файл на основе измененных параметров, запускает расчет НДС, считывает результаты из файла и далее процесс повторяется до нахождения оптимума.

### Конструктивная оптимизация пера лопатки и диска вентилятора

На ряде примеров конструктивной оптимизации пера лопатки и диска вентилятора (рис. 2) показана эффективность применения средств оптимального проектирования и зависимость результатов решения от выбранных критериев и ограничений. Задача снижения массы конструкции, получения напряженно-деформированного состояния в лопатке и диске, удовлетворяющего требованиям и ограничениям по технологичности и прочности, относится к задачам проектирования формы детали.



Рис. 2. Модель сектора ступени вентилятора

Основными целями рационального проектирования ступени вентилятора с широкохордной лопаткой являются стремление увеличить надежность и ресурс и уменьшить массу конструкции с учетом влияющих на надежность вентиляторной ступени вибраций лопаток, уровней максимальных напряжений в пере и ножке лопатки и в замковом соединении лопатки с диском.

В процессе оптимального проектирования определяется форма лопатки, обеспечивающая выполнение ограничений на напряжения и деформации, минимум массы и минимум отклонения поверхностей лопатки в рабочем (деформированном) состоянии относительно расчетных аэродинамических поверхностей. Решение этих задач достигается путем управления выносами сечений лопатки (рис.3). Аэродинамические поверхности спинки и корыта пера лопатки определяются в результате аэродинамического

профилирования и задаются в виде набора сечений. Смещения этих сечений вдоль и вокруг оси вращения в определенных пределах при сохранении углов входа и выхода потока оказывают незначительное влияние на газодинамические характеристики потока в решетке, но существенно сказываются на напряженно-деформированном состоянии пера лопатки, а также на силах и моментах, приходящих на хвостовик замкового соединения.

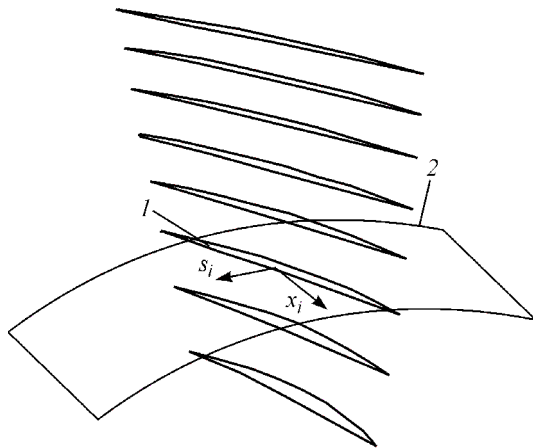


Рис. 3. Параметризация выносов сечений пера лопатки: 1 –  $i$ -е сечение; 2 – поверхность смещения сечения

В качестве примера рассмотрена задача определения начальной формы лопатки вентилятора по заданной рабочей форме. Под действием центробежных и газовых нагрузок лопатка занимает определенное рабочее положение. Даже при задании предварительной закрутки (прикрытия) лопатки ни на одном из режимов рабочее положение не совпадет с проектным. Для широкохордных лопаток вентилятора свойственна более сложная картина деформирования, при которой происходит не только смещение и разворот сечений, но и деформация самих сечений.

Таким образом, ограничения на жесткость лопатки, связанные с необходимостью обеспечения приемлемых аэродинамических характеристик на разных режимах работы двигателя, могут стать одними из основных при выборе конструкции лопатки. Основной трудностью решения задачи является выработка обобщенных критериев, оценивающих изменение аэродинамических показателей ступени на разных режимах работы двигателя.

Задача оптимизации заключается в поиске такой начальной формы лопатки, которая под действием центробежных нагрузок и давлений минимально отклоняется от аэродинамического положения. Критерием оптимизации является минимальное расстояние между характерными точками необходимого рабочего положения лопатки и рабочего положения оптимальной лопатки. Характерные точки выбираются по сечениям на входной и выходной кромках лопатки [3]. Можно также рассматривать более общие сплайновые модели, описывающие отклонения поверхностей лопатки.

Для различных вариантов параметризации лопатки и выбранных законов управления формой лопатки можно получить разное максимальное отклонение лопатки на рабочем режиме от заданного аэродинамического профиля. На рис. 4 показано отклонение входной и выходной кромки лопатки: 1 – исходная лопатка; 2 – оптимальная лопатка. По осям отложены величины: относительная длина лопатки  $h$ ; отклонение кромок  $u$ . Ось ординат  $Oh$  соответствует заданному аэродинамическому профилю. При использовании в качестве изменяемых параметров управления предварительных смещений сечений лопатки в окружном и осевом направлениях отклонение оптимального профиля от заданного аэродинамического профиля лопатки вентилятора на периферийном сечении составляет 1,7 мм по сравнению с отклонением исходного профиля, равного 4 мм (рис. 4,а). Включение в управляющие параметры возможности предварительного поворота сечения вокруг оси лопатки позволяет снизить максимальное отклонение от аэродинамического профиля до 1 мм (рис. 4,б). При этом максимальные напряжения в лопатке не должны превышать допустимых значений.

Изменение формы лопатки приводит к изменению сил, действующих в зоне контактного взаимодействия хвостовика лопатки с замковыми выступами диска, поэтому начальная конфигурация лопатки, полученная из решения общей задачи с учетом контактного взаимодействия хвостовика с диском, может отличаться от начальной конфигурации, полученной в рамках модели изолированной лопатки.

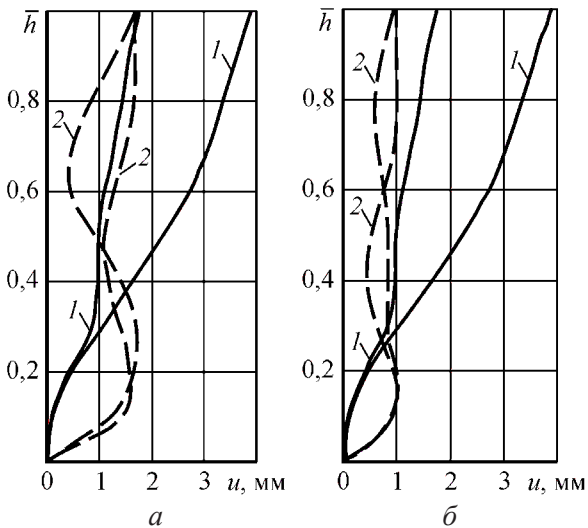


Рис. 4. Отклонение исходного и оптимального профилей в рабочем положении от заданного аэродинамического профиля лопатки вентилятора

Методика оптимального проектирования применена при создании конструкции ступени вентилятора с круговым замковым соединением диска и лопатки (см. рис.2).

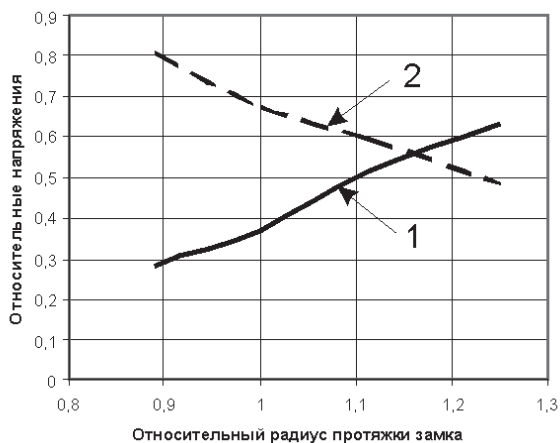


Рис. 5. Зависимость напряжений в лопатке 1 и замковом пазе диска 2 от радиуса протяжки замка

В замковом соединении большой протяженности замок может работать неэффективно, так как конструкция широкохордной лопатки приводит к неравномерности распределения контактных напряжений и соответственно неполному контакту между поверхностями хвостовика и замковых выступов диска. Изменение размеров ступицы и цапфы диска позволяет снизить эту неравномерность.

Поиск оптимального решения необходимо вести с учетом взаимодействия всех деталей. В ступени вентилятора размеры замкового соединения оказывают существенное

влияние на максимальные напряжения в деталях. На рис. 5 показана зависимость напряжений в хвостовике лопатки и замковом пазе диска от радиуса протяжки кругового замка.

Решение задачи оптимизации по критерию минимизации напряжений отдельно для лопатки и для диска дает оптимумы расположенные на противоположных границах диапазона изменения радиуса протяжки замка. При увеличении этого радиуса повышаются напряжения в хвостовике лопатки, но уменьшаются напряжения в замковом пазе диска. Очевидно, что точка пересечения двух графиков является оптимумом по критерию минимизации напряжений для всей ступени вентилятора. Это компромиссное значение радиуса протяжки замка необходимо использовать при проектировании ступени вентилятора.

#### Заключение

Рассмотрены общие принципы применения методов оптимизации формы детали при автоматизированном проектировании деталей и узлов ГТД. Показаны примеры конструктивной оптимизации пера лопатки и диска вентилятора.

Результаты получены с помощью программного комплекса, состоящего из модуля анализа конструкции на основе метода конечных элементов и модуля оптимизации на основе алгоритма последовательной квадратичной аппроксимации. Универсальность комплекса заключается в том, что он позволяет в качестве модуля анализа использовать различные программы МКЭ. Это обеспечивается выбранной системой параметризации для проектируемой детали или узла и разработанным внутренним командным языком.

Применение этой методики в комплексе с системой многодисциплинарного моделирования, представляющей термомеханическую модель узла ГТД, позволяет создать конструкции ступени вентилятора перспективного ГТД для БСМС, удовлетворяющие заданным требованиям к массе и ресурсу.

#### Библиографический список

1. Темис, Ю.М. Оптимальное проектирование конструктивных элементов ГТД [Текст] / Ю.М. Темис, Д.А. Якушев // Тех-

ника воздушного флота, №1(694). М.: ЦАГИ, 2009. - С.54–64.

2. Темис, Ю.М. Оптимальное проектирование конструктивных элементов ГТД [Текст] / Ю.М. Темис, Д.А. Якушев // Скибин В.А. Машиностроение: энциклопедия. Т. IV-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 3. Авиационные двигатели. / В.А. Скибин, В.И. Солонин, Ю.М. Темис [и др.]; под ред.

В.А. Скибина, Ю.М. Темиса, В.А. Сосунова. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 570-579.

3. Темис, Ю.М. Оптимизация формы лопаток по критерию минимума изгибных напряжений [Текст] / Ю.М. Темис, О.С. Рожков // XVI Международная конференция по теории оболочек и пластин: труды. Т3.- Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1994. - С.208–226.

## **GTE PARTS OPTIMAL DESIGN**

© 2011 Yu.M. Temis, D.A.Yakushev

Central Institute of Aviation Motors

Modern concepts of using optimization technologies for structural design are considered. Several approaches of optimization problems for fan and compressor stages elements are considered. The problem of blade and disk optimization and the problem of total stresses minimization under certain constraints are investigated. All results were obtained using developed FE analysis program connected with SQP optimization procedure.

*Optimal design, disk, blade, fan stage.*

### **Информация об авторах**

**Темис Юрий Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела математического моделирования ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». E-mail: [tejoum@ciam.ru](mailto:tejoum@ciam.ru). Область научных интересов: многодисциплинарное математическое моделирование; оптимизация, динамика и прочность конструкций; проблемы ресурса; численные методы; нелинейные проблемы пластичности, ползучести.

**Якушев Денис Алексеевич**, начальник сектора отдела математического моделирования ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». E-mail: [tejoum@ciam.ru](mailto:tejoum@ciam.ru). Область научных интересов: многодисциплинарное математическое моделирование; оптимальное проектирование.

**Temis Yuriy Moiseevich**, doctor of technical sciences, professor, head of Mathematical simulating department of Central Institute of Aviation Motors. E-mail: [tejoum@ciam.ru](mailto:tejoum@ciam.ru). Area of research: multidisciplinary mathematical simulation; optimization, dynamic and strength of constructions; durability; numerical methods; nonlinear problem of plasticity and creep.

**Yakushev Denis Alekseevich**, sector leader of Mathematical simulating department of Central Institute of Aviation Motors. E-mail: [tejoum@ciam.ru](mailto:tejoum@ciam.ru). Area of research: multidisciplinary mathematical simulation; optimal design.