

На правах рукописи

КРУПЕНИЧ Илья Николаевич

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ТРДД
НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Самара-2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» на кафедре теории двигателей летательных аппаратов

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузьмичев Венедикт Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кривошеев Игорь Александрович

доктор технических наук, профессор
Данильченко Валерий Павлович

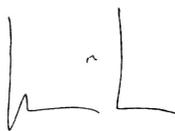
Ведущая организация: ОАО «Самарское конструкторское
бюро машиностроения»

Защита состоится «28» июня 2010 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 27 мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



2

Головин А.Н

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из основных задач этапа концептуального проектирования ТРДД является формирование облика его турбокомпрессора.

С одной стороны определение диаметральных размеров проточной части и числа ступеней лопаточных машин, а также уточнение их схемы проводится после решения задачи выбора параметров рабочего процесса двигателя, с другой стороны – предшествует детальному газодинамическому проектированию лопаточных машин. Это обуславливает высокую значимость данной задачи в общем процессе проектирования ТРДД.

Анализ опубликованных работ показал, что проблема структурно-параметрической оптимизации турбокомпрессоров ТРДД до сих пор не получила должного решения.

Рациональный выбор конструктивно-геометрических параметров и схемы ТРДД является необходимым условием его успешного проектирования. Поэтому разработка методов и автоматизированных средств оптимизации облика турбокомпрессора ТРДД на этапах концептуального проектирования является актуальным направлением исследований для дальнейшего повышения эффективности эксплуатации ТРДД и снижения стоимости его жизненного цикла.

Цель работы

Повышение эффективности и сокращение сроков создания авиационных двухконтурных двигателей путем разработки методов и автоматизированных средств структурно-параметрической оптимизации конструктивно-геометрического облика их турбокомпрессора.

Задачи исследования

1. Разработка универсального метода согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора ТРДД.
2. Выбор и обоснование критериев структурно-параметрической оптимизации турбокомпрессора.
3. Разработка методов оптимизации конструктивно-геометрических параметров и схем турбокомпрессоров по совокупности критериев эффективности ТРДД.
4. Разработка автоматизированной подсистемы формирования облика турбокомпрессоров ТРДД на этапе концептуального проектирования.
5. Исследование влияния конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора на массу ТРДД.
6. Апробация разработанных методов и оценка их адекватности.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использованы методы теории рабочих процессов ГТД, системного анализа, лопаточных машин, математического моделирования, вычислительной математики и САПР.

Научная новизна

1. Разработан новый универсальный метод согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессоров ТРДД, позволяющий полностью автоматизировать алгоритм согласования параметров турбокомпрессоров произвольных схем с различными типами лопаточных машин.
2. Разработан метод структурно-параметрической оптимизации турбокомпрессора ТРДД, отличающийся тем, что позволяет обосновать его наиболее рациональные конструктивно-геометрические параметры и схему на основе комплекса технико-экономических показателей двигателя.
3. Разработана модифицированная математическая модель поузловой оценки массы ТРДД.
4. Выявлены закономерности влияния основных конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора на массу ТРДД.
5. Создана подсистема САПР, позволяющая формировать наиболее рациональный конструктивно-геометрический облик турбокомпрессоров ТРДД.

Практическая значимость

Разработанные методы и полученные результаты позволяют повысить эффективность, а также сократить сроки создания проектируемых ТРДД за счет целенаправленного поиска рационального конструктивно-геометрического облика их турбокомпрессоров.

Практическая значимость подтверждается тем, что работа выполнялась в рамках инновационной образовательной программы «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий» национального проекта «Образование», а также по заданию Федерального агентства по образованию в рамках темы «Развитие теоретических основ оптимального проектирования двигателей атмосферных летательных аппаратов и энергетических установок».

Результаты исследований по оптимизации проточной части турбокомпрессора ТРДД, разработанная автоматизированная система термогазодинамического расчета и проектирования ГТД внедрены в учебный процесс кафедры теории двигателей летательных аппаратов СГАУ.

Кроме того, разработанная автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа ГТД различных типов и схем

(АСТРА) нашла практическое применение на кафедре «Турбинные двигатели и установки» ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (гос. контракт №528/07-ГК).

Апробация работы. Результаты работы прошли экспертизу и обсуждались на следующих конференциях: международная научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» (Москва, ЦИАМ, 2005 г.); международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, СГАУ, 2005, 2006 и 2009 г.); X всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2007» (Пермь, ПГТУ, 2007 г.). Кроме того, результаты работы докладывались на научно-технических совещаниях и семинарах в СГАУ и Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе: 3 статьи в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК; 2 учебных пособия, 9 публикаций в трудах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации 179 страниц, 68 рисунков, список использованных источников из 120 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана общая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы опубликованные работы и проблемы проектирования турбокомпрессоров ТРДД, сформулированы цель и задачи исследования.

Развитию теории выбора рациональных схемных признаков турбокомпрессоров и их конструктивно-геометрических параметров посвящены работы Холщевникова К.В., Сосунова В.А., Цховребова М.М., Шляхтенко С.М., Митрохина В.Т., Емина О.Н., Кузьмичева В.С., Новикова А.С., Коровкина В.Д., Абианца В.Х., Аронова Б.М., Копелева С.З., Тунакова А.П. и других ученых.

Одной из основных проблем при проектировании турбокомпрессоров ТРДД является многообразие их конструктивно-схемных решений. Для одного и того же целевого назначения проектируются двух и трехвальные турбокомпрессора с подпорными ступенями и без них, с различными типами компрессоров (осевой, осецентрибежный), камер сгорания (прямоточная, противоточная), с регулируемыми и неподвижными направляющими аппаратами компрессора, с лопаточными машинами,

снабженными бандажными полками и без них и т.д. Многообразие возможных конструктивных схем турбокомпрессора приводит к тому, что простой перебор возможных решений для нахождения оптимального становится слишком трудоемким.

Для каждой заданной схемы турбокомпрессора необходимо, кроме того, провести оптимизацию характеризующих его конструктивно-геометрических параметров с учетом их согласования.

Обилие показателей, характеризующих эффективность турбокомпрессора, приводит к необходимости проведения многокритериальной оптимизации. Это обуславливает необходимость разработки методов многокритериальной многопараметрической оптимизации, основанных на формировании области компромиссов, выделении множества эффективных решений с дальнейшим его сужением на основе определенной стратегии выбора оптимального решения. Еще одной проблемой концептуального этапа проектирования турбокомпрессора является необходимость выполнения большого количества ограничений. Ограничения связаны с прочностью материала лопаток турбомашин и необходимостью обеспечения заданного ресурса, необходимостью расположения конструктивных элементов двигателя (таких как опоры, замки лопаток рабочих колес и т.д.), обеспечения приемлемых уровней КПД лопаточных машин, плавности проточной части турбокомпрессора и т.д.

Таким образом, основными факторами, порождающими проблемы начального этапа проектирования турбокомпрессора ТРДД являются:

- разнообразие конструктивных схем;
- обилие показателей эффективности, многокритериальность и сложность выбора критериев оптимальности;
- недостаток необходимых методик расчета критериев оценки турбокомпрессора;
- отсутствие универсального метода согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора ТРДД;
- отсутствие методов структурной и параметрической многокритериальной оптимизации турбокомпрессоров ТРДД;
- большое количество ограничений на параметры турбокомпрессора.

Для решения этих задач необходимо развитие математических моделей, позволяющих проводить структурно-параметрическую оптимизацию турбокомпрессора, а также специализированных подсистем САПР.

Во второй главе сформулирована задача формирования наиболее рационального облика турбокомпрессора ТРДД, предложен алгоритм ее решения, описаны разработанные математические модели

определения показателей эффективности объекта проектирования, согласования и оптимизации конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора, а также оптимизации конструктивно-схемных признаков турбокомпрессора.

Задача формирования рационального облика турбокомпрессора является многокритериальной задачей условной структурно-параметрической оптимизации и математически может быть сформулирована следующим образом:

$$\Omega^* = \arg \left\{ \min_S \left[\min_X F(X, S) \right] \right\},$$

$$\text{при условии } q_e(X, C) \leq 0, a_f \leq x_f \leq b_f,$$

где $\Omega^* = \{X, S\}$ – множество искомых параметров;

$F(X, S)$ – целевая функция;

$q_e(X, C)$ – заданные функциональные ограничения;

$$X = \left(\lambda_{\text{к.вх}}, \lambda_{\text{к.вых}}, \lambda_{\text{т.вх}}, \lambda_{\text{т.вых}}, \bar{d}_{\text{к.вых}}, \left(\frac{D_{\text{ср}}}{h} \right)_{\text{т.вх}}, z_{\text{т.ж}}, z_{\text{к.ж}}, \dots \right) -$$

вектор оптимизируемых конструктивно-геометрических параметров размерности n ;

$S = (s_1, s_2, \dots)$ – множество конструктивно-схемных признаков

(число валов, тип компрессора, турбин, КС и т.д.), определяющих k -ю схему турбокомпрессора;

$C = (c_1, c_2, \dots)$ – заданные исходные проектные данные;

a_f, b_f – ограничения на проектные переменные.

Совокупность искомых параметров $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, s_1, s_2, \dots\}$ представляет собой множество независимых переменных X и схемных признаков S , которые определяют концепцию проекта, характеризуют все конструктивно-геометрические параметры турбокомпрессора, схему турбокомпрессора и однозначно определяют значения частных критериев эффективности двигателя.

Целевая функция F формируется из множества значений частных критериев эффективности $Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots)$ как аддитивная свертка критериев $F = \sum_i [\rho_i \delta y_i(X, S_k)]$. Здесь δy_i – нормированная по

оптимальному значению $\left[\delta y_i = (y_i - y_i^{\text{opt}}) / y_i^{\text{opt}} \right]$ величина i -го критерия; ρ_i – коэффициент важности (весомости) i -го критерия.

Формирование оптимального облика турбокомпрессора можно разбить на три вложенных задачи. Первая заключается в согласовании конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора при заданном векторе оптимизируемых параметров X . Суть второй задачи сводится к определению оптимальных конструктивно-геометрических параметров для каждой из выбранных схем турбокомпрессора ТРДД. Третья задача является задачей структурной оптимизации, решение которой осуществляется при целенаправленном переборе возможных конструктивно-схемных решений с оптимальными конструктивно-геометрическими параметрами и выборе наилучшего варианта облика турбокомпрессора на основе комплекса критериев оценки.

Разработанный метод согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора обеспечивает расчет заданной схемы турбокомпрессора за счет непосредственного решения системы нелинейных алгебраических уравнений, связывающей конструктивно-геометрические параметры турбокомпрессора, и дает возможность поиска рационального конструктивно-геометрического облика турбокомпрессора в режиме оптимизации.

В общем случае задача отыскания оптимальных конструктивно-геометрических параметров – это задача многокритериальной нелинейной оптимизации заданной схемы турбокомпрессора, в которой каждый из рассматриваемых критериев эффективности есть функция y_{ik} , зависящая от вектора оптимизируемых параметров X и заданных исходных проектных данных C . При этом оптимизируемые и заданные величины связаны друг с другом уравнениями и вместе с ограничениями на искомые величины образуют математическую модель турбокомпрессора:

$$\varphi_e(X, C) = 0, \quad q_j(X, C) \geq 0.$$

В процессе оптимизации функциональные ограничения и ограничения на оптимизируемые переменные учитываются введением штрафов на целевую функцию при их невыполнении:

$$F_{\text{штраф}} = \begin{cases} K_f \cdot \frac{a_f - x_f}{a_f}, & \text{при } x_f < a_f; \\ K_f \cdot \frac{x_f - b_f}{b_f}, & \text{при } x_f > b_f; \\ K_e \cdot |q_e(X, C)|, & \text{при } q_e(X, C) > 0. \end{cases}$$

Особенностью третьей задачи – структурной оптимизации – является формализация конструктивно-схемных признаков турбокомпрессора и разработка метода выбора рациональной конструктивной схемы, поскольку прямой перебор всех возможных потенциальных вариантов практически невозможен.

Задача принятия решений в процессе структурного синтеза формулируется следующим образом:

$$ЗПП = \langle S, Y, \Psi, P \rangle,$$

где S – множество альтернатив проектного решения,

$\Psi(X, C, Y) = 0$ – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев,

P – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

Простейший способ задания множества S – явное перечисление всех возможных альтернатив, однако оно возможно лишь при малой мощности множества. В большинстве случаев используют неявное описание множества S в виде способа (алгоритма или набора правил R) синтеза проектных решений из ограниченного набора элементов \mathcal{E} . Таким образом, $S_k = \langle R, \mathcal{E} \rangle$.

Для описания множеств R и \mathcal{E} используют следующие подходы:

- морфологические таблицы и альтернативные И-ИЛИ-деревья;
- представление знаний в интеллектуальных системах;
- генетические алгоритмы.

Для проведения оптимизационных расчетов необходимо выделить критерии, позволяющие сравнивать отдельные варианты проектируемого турбокомпрессора. Из всей совокупности критериев эффективности двигателя и его узлов выделяют те критерии, которые характеризуют турбокомпрессор: масса двигателя, его стоимость и трудоемкость изготовления, число деталей (или число ступеней турбокомпрессора), стоимость жизненного цикла двигателя, удельный расход топлива и т.д.

Для рассматриваемого этапа проектирования в качестве важнейшего показателя выбрана масса двигателя как интегральный показатель, учитывающий изменение конструктивно-геометрических параметров и схемных признаков турбокомпрессора. В данной работе за основу взята поузловая модель двигателя, разработанная в ЦИАМ. Для повышения адекватности модели была произведена её модификация на основании данных, полученных с использованием твердотельных трехмерных компьютерных моделей полноразмерных авиационных ТРДД, а также данных о параметрах существующих двигателей (НК-8, НК-86, НК-93 и др.)

Третья глава посвящена практической реализации предлагаемых математических моделей и алгоритмов в САПР турбокомпрессоров ТРДД. На основании разработанных методов и математических моделей создана автоматизированная подсистема формирования рационального облика турбокомпрессора (АСТРА-ТКО), которая позволяет решать следующие основные задачи:

- формирование схемы турбокомпрессора по заданным конструктивно-схемным признакам;
- формирование матрицы связей конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора;
- согласование конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора;
- определение значений критериев эффективности, характеризующих сформированный вариант турбокомпрессора;
- многокритериальная структурно-параметрическая оптимизация турбокомпрессора ТРДД, включающая оптимизацию конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора заданной схемы и выбор рациональной схемы турбокомпрессора с учетом ограничений, накладываемых на параметры турбокомпрессора;
- исследование влияния параметров на облик турбокомпрессора и критерии его оценки;
- расчет геометрических параметров и формирование схемы проточной части турбокомпрессора;
- формирование результатов проектирования в различных форматах.

Для реализации модульной структуры программного обеспечения подсистемы был проведен анализ, который позволил разбить задачи определения облика проточной части турбокомпрессора ТРДД на подзадачи и выделить их иерархическую структуру. Был определен состав и подчиненность функций подсистемы, а затем набор программных модулей, реализующих эти функции (рисунок 1).

Подсистема АСТРА-ТКО обладает графическим интерфейсом, который позволяет в интерактивном режиме осуществлять формирование задач проектирования рационального облика турбокомпрессора (рисунок 2).

Разработан вариант подсистемы, адаптированный для использования его в учебном процессе, который позволит студентам осуществлять вариантное проектирование, исследовать взаимосвязь параметров турбокомпрессора и наглядно оценивать их влияние на облик проточной части.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния конструктивно-геометрических параметров ТРДД на его массу. В качестве объекта исследований рассматривается двухвальный ТРДД

без подпорных ступеней ($\pi_{\text{КС}}^* = 32, T_{\text{Г}}^* = 1600\text{K}$, $m = 6,1$, суммарный расход воздуха через двигатель $G_{\text{В}\Sigma} = 340\text{кг/с}$).

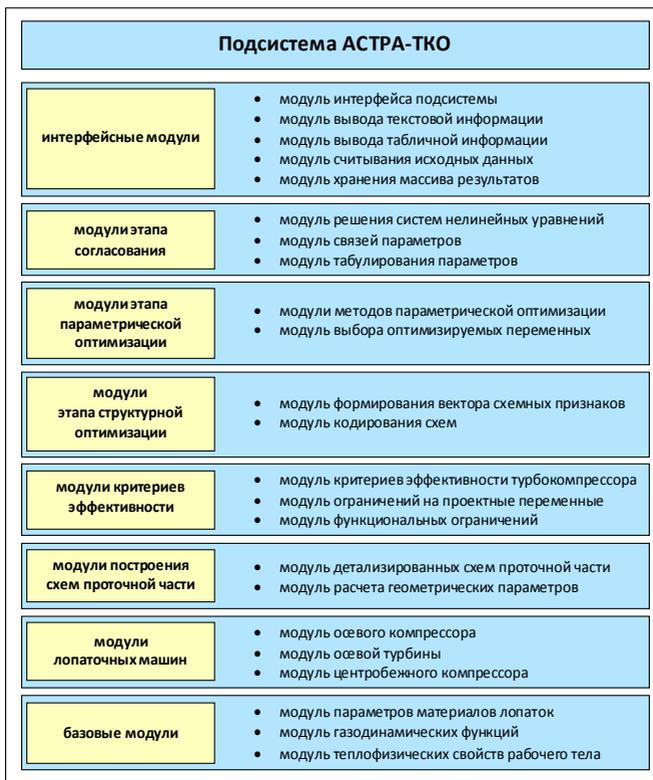


Рисунок 1 – Структура программных модулей подсистемы АСТРА-ТКО

Исследована зависимость массы ТРДД от приведенных скоростей потока λ_i на входе и выходе его лопаточных машин, от относительного диаметра втулки \bar{d}_i на входе и выходе вентилятора и компрессора ВД, от величины отношения $D_{\text{ср}}/h_{\text{л}}$ на входе и выходе турбин, от нагруженности y_i^* его турбин и напорности \bar{H}_i компрессоров, а также от длительности τ работы двигателя на режимах, эквивалентных максимальному.

Графики зависимости массы ТРДД от параметров турбокомпрессора, влияние которых наиболее существенно, представлены на рисунках 3-6.

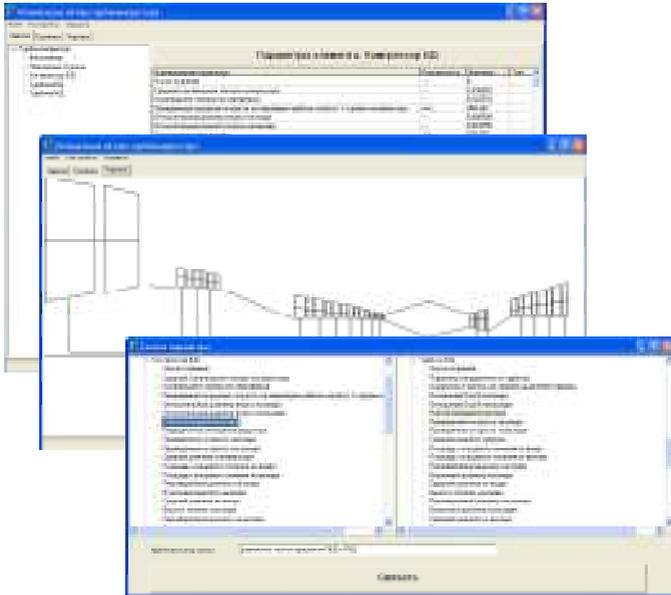


Рисунок 2 – Интерфейс подсистемы

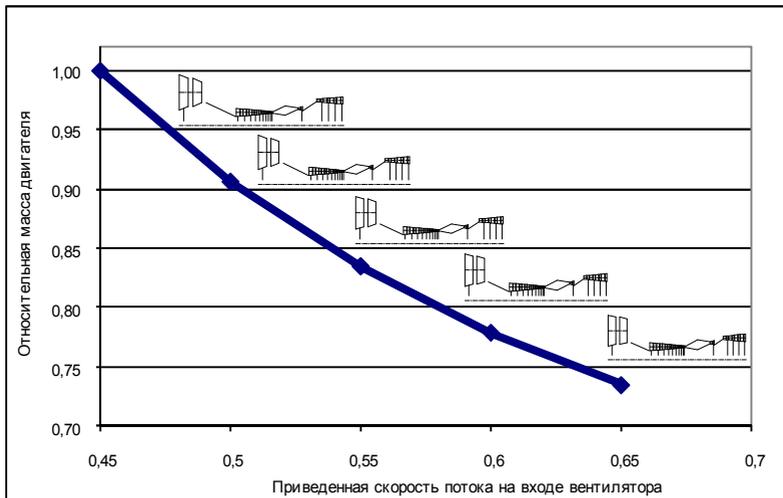


Рисунок 3 – Зависимость относительной массы $\bar{M}_i = M_i/M_{\max}$ двигателя от приведенной скорости на входе вентилятора

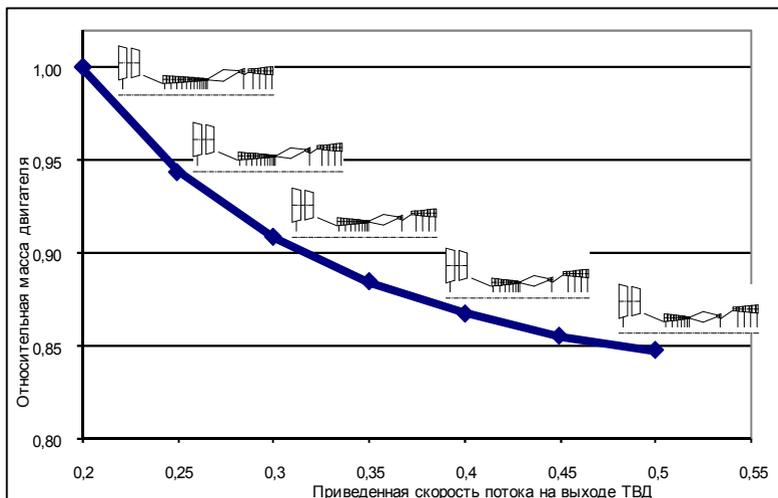


Рисунок 4 – Зависимость относительной массы $\bar{M}_i = M_i/M_{\max}$ двигателя от приведенной скорости на выходе ТВД

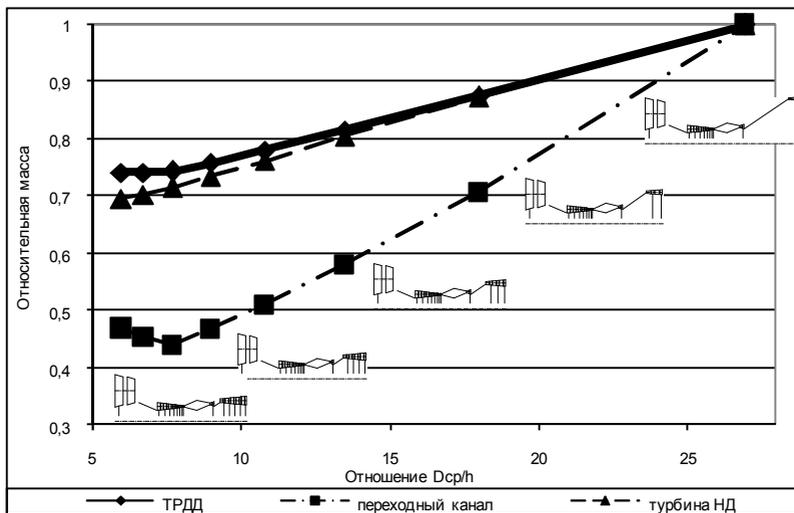


Рисунок 5 – Зависимость относительной массы $\bar{M}_i = M_i/M_{\max}$ ТРДД, турбины НД и переходного канала от отношения D_{cp}/h_l на входе ТНД

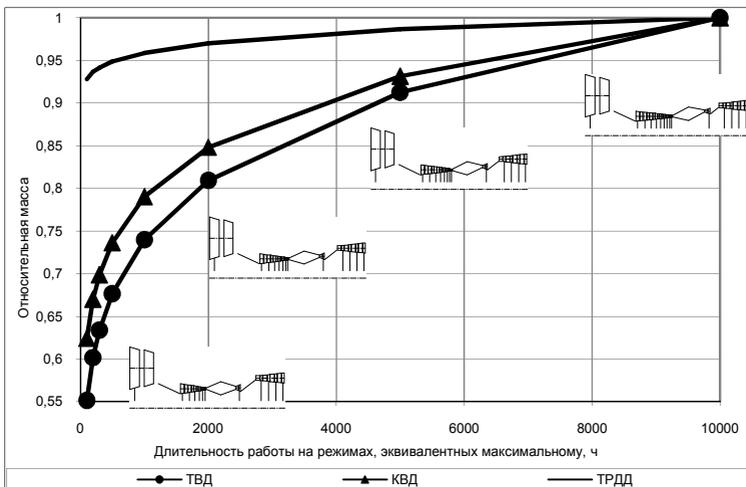


Рисунок 6 – Зависимость относительной массы $\bar{M}_i = M_i/M_{\max}$ ТРДД, компрессора и турбины ВД от τ

Пятая глава посвящена апробации разработанных в работе методов.

Сопоставление схемы проточной части двигателя, полученной с помощью подсистемы и истинной схемы Д-30КУ (рисунок 7) позволяет говорить об адекватности разработанных методов и математических моделей. В работе представлены значения основных конструктивно-геометрических параметров, характеризующих эти схемы.

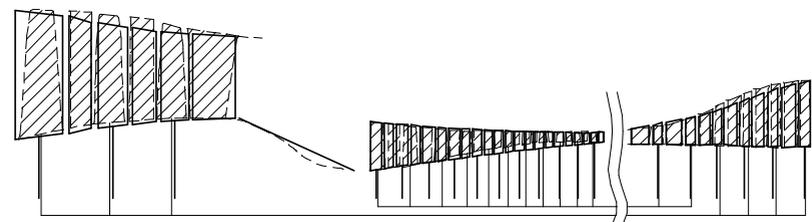
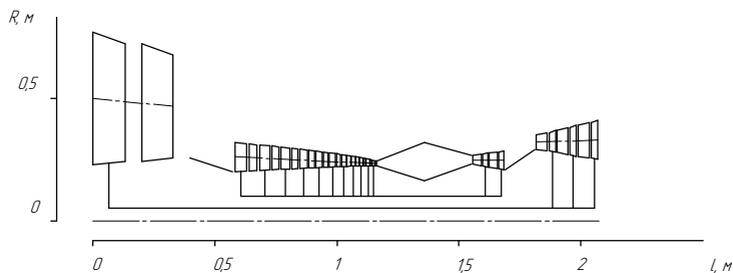


Рисунок 7 – Сравнение схем проточных частей:
 - - - - - схема двигателя Д-30КУ;
 ————— схема, полученная с помощью подсистемы.

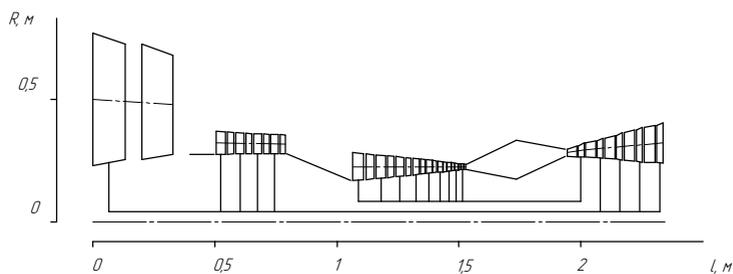
В качестве примера в таблице 1 и на рисунке 8 приведены результаты проектирования вариантов проточной части

перспективного ТРДД типа CFM56-5B-8 ($\pi_{к\Sigma}^* = 32, T_r^* = 1600K, m = 6,1$, суммарный расход воздуха через двигатель $G_{в\Sigma} = 340 \text{ кг/с}$):

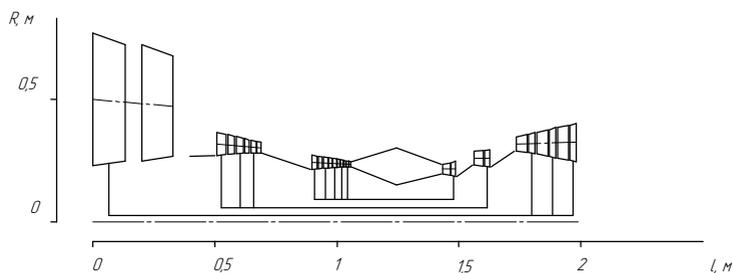
- двухвальной схемы двигателя без подпорных ступеней;
- двухвальной схемы двигателя с подпорными ступенями;
- трехвальной схемы двигателя.



а) двухвальная схема двигателя $z_{\Sigma} = 17, M_{\Sigma} = 1236 \text{ кг}$



б) двухвальная схема двигателя с подпорными ступенями $z_{\Sigma} = 19, M_{\Sigma} = 1293 \text{ кг}$



в) трехвальная схема двигателя $z_{\Sigma} = 14, M_{\Sigma} = 1176 \text{ кг}$

Рисунок 8 – Сравнение вариантов проточной части перспективного ТРДД с оптимизированными параметрами

Таблица 1. Выбор оптимального варианта двигателя из множества эффективных решений

Параметр \ Вариант схемы	двухвальная схема	двухвальная схема с ПС	трехвальная схема
Масса двигателя, M_{Σ} , кг	1236	1293	1176
Суммарное число ступеней, z_{Σ}	17	19	14
δM_{Σ}	0,051	0,099	0
δz_{Σ}	0,214	0,357	0
Целевая функция $F = \sum \delta y_i$	0,265	0,456	0
Оптимальный вариант			☆

Оценка эффективности разработанных методов проектирования и автоматизированных средств производилась на основе показателей эффективности двигателя в системе ЛА: удельных затрат топлива ЛА и себестоимости перевозок.

Как видно из таблицы 1, переход от двухвальной схемы с подпорными ступенями к трехвальной схеме ТРДД приведет к соответствующему снижению массы на 9%. С помощью подсистемы АСТРА-ОПТ определены коэффициенты влияния массы ТРДД на указанные критерии оценки ЛА и определено, что выбор рациональной схемы при проектировании турбокомпрессора ТРДД приводит к улучшению показателей эффективности ЛА на величину около 2%.

Что касается сроков создания двигателя, то произведенный анализ показал, что благодаря использованию разработанных методов проектирования и автоматизированных средств сроки проектирования турбокомпрессоров могут быть сокращены не менее, чем в два раза, что согласуется с зарубежным и отечественным опытом.

На основании изложенного можно сделать вывод, что цель данного исследования достигнута.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования решена актуальная научная задача и получены следующие основные результаты:

1. Разработан новый универсальный метод согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессоров ТРДД за счет непосредственного решения системы уравнений, позволяющий полностью автоматизировать согласование параметров турбокомпрессоров произвольных схем.

2. Разработан метод структурно-параметрической оптимизации

турбокомпрессора, позволяющий обосновать его наиболее рациональные конструктивно-геометрические параметры и схему на основе комплекса технико-экономических показателей системы более высокого уровня – ТРДД.

3. Разработана модифицированная математическая модель поузловой оценки массы ТРДД.

4. Создана автоматизированная подсистема АСТРА-ТКО, позволяющая на этапе концептуального проектирования формировать рациональный облик турбокомпрессора ТРДД и обосновывать конструктивное решение.

5. С помощью разработанной подсистемы АСТРА-ТКО выполнено исследование влияния основных конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессора на массу ТРДД, а также выполнена структурно-параметрическая оптимизация турбокомпрессора перспективного ТРДД типа CFM56-5B-8.

6. Показано, что наибольшее влияние на массу ТРДД со степенью двухконтурности порядка 4-8 оказывают конструктивно-геометрические параметры турбовентилятора, поскольку его масса составляет около 85% общей массы двигателя.

7. На примере проектирования турбокомпрессора перспективного ТРДД типа CFM56-5B-8 показано, что для данного комплекса параметров преимущество имеет трехвальная конструктивная схема.

8. Показано, что применение разработанных автоматизированных средств позволяет сократить сроки проектирования турбокомпрессоров не менее чем в два раза и приводит к улучшению показателей эффективности ЛА на величину около 2%.

9. Доказана адекватность разработанных методов и математических моделей путем сравнения полученных результатов с результатами проектирования облика конкретных выполненных турбокомпрессоров ТРДД.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Ткаченко А.Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №2(10). – Ч.2. – С. 66-73с.
2. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С., Кулагин В.В. Вариантное автоматизированное проектирование проточной части турбокомпрессора

авиационных ГТД // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №2(10). – Ч.2. – С. 76-82с.

3. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С. Метод согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессоров ТРДД // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №2(10). – Ч.2. – С. 73-76с.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций:

4. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С. Проблемы концептуального проектирования турбокомпрессоров ГТД. Тезисы международной научно-технической конференции “Авиадвигатели XXI века”, том I – М. ЦИАМ, 2005. – с.100.

5. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С., Кулагин В.В. Вариантное автоматизированное проектирование проточной части турбокомпрессора авиационных ГТД. Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 21-23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. Ч. 2, 119-120 с.

6. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Ткаченко А.Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей. Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 21-23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. Ч. 2, 120-122 с.

7. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С. Метод согласования конструктивно-геометрических параметров турбокомпрессоров ТРДД. Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 21-23 июня 2006 г. – Самара: СГАУ, 2006. Ч. 2, 122-124 с.

8. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Универсальная автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-2) газотурбинных двигателей и энергетических установок. Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2007» (25-26 июня 2007 года, Пермь). – Изд-во Пермского государственного технического ун-та, 2007. – С 163-165.

9. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Проблемы начального этапа проектирования турбокомпрессора ТРДД. Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2007» (25-26 июня 2007 года, Пермь). – Изд-во Пермского государственного технического ун-та, 2007. – С 165-168.

10. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Постановка задачи формирования облика турбокомпрессора ТРДД. Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника

и высокие технологии – 2007» (25-26 июня 2007 года, Пермь). – Изд-во Пермского государственного технического ун-та, 2007. – С 168-170.

11. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С. Автоматизированная подсистема формирования оптимального облика турбокомпрессора ТРДД (АСТРА-ТК-2). Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 24-26 июня 2009 г. – Самара: СГАУ, 2009. Ч. 2, 27-28 с.

12. Крупенич И.Н., Кузьмичев В.С. Многокритериальная структурно-параметрическая оптимизация турбокомпрессора ТРДД. Проблемы и перспективы развития двигателестроения / Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 24-26 июня 2009 г. – Самара: СГАУ, 2009. Ч. 2, 6-7 с.

Учебные пособия:

13. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Бочкарев С.К., Ткаченко А.Ю. Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный термогазодинамический расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА-ПР). Учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 76 с.: ил.

14. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ТК. Учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 80с.: ил.

Методические указания:

15. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ПР в PDM системе SmarTeam. Метод. указания.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 48с.

16. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием АСТРА-ТК в PDM системе SmarTeam. Метод. указания.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 40с.

17. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Совместная работа узлов и расчет характеристик ГТД с использованием АСТРА-ВСХ в PDM системе SmarTeam. Метод. указания.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 40с.

Электронные издания:

18. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Бочкарев С.К., Ткаченко А.Ю. Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный термогазодинамический расчет ГТД с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа

(АСТРА-ПР). [Электронный ресурс]. – Электр. текстовые и граф. данные (79 Мбайт, печатный аналог – 4,75 п.л.): электр. учеб. пособие. – Самара: Центр новых информ. технологий Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 1 электр. опт. диск (CD ROM).

19. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ТК. [Электронный ресурс]. – Электр. текстовые и граф. данные (71,7 Мбайт, печатный аналог – 5 п.л.): электр. учеб. пособие. – Самара: Центр новых информ. технологий Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 1 электр. опт. диск (CD ROM). Систем. требования: ПК Pentium; Windows 2000 или выше.

20. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием подсистемы АСТРА-ПР в PDM системе SmarTeam. [Электронный ресурс]. – Электр. текстовые и граф. данные (печатный аналог – 3 п.л.): электр. метод. указания. – Самара: Центр новых информ. технологий Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 1 электр. опт. диск (CD ROM).

21. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием АСТРА-ТК в PDM системе SmarTeam. [Электронный ресурс]. – Электр. текстовые и граф. данные (печатный аналог – 2,5 п.л.): электр. метод. указания. – Самара: Центр новых информ. технологий Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 1 электр. опт. диск (CD ROM).

22. Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Совместная работа узлов и расчет характеристик ГТД с использованием АСТРА-BCX в PDM системе SmarTeam. [Электронный ресурс]. – Электр. текстовые и граф. данные (печатный аналог – 2,5 п.л.): электр. метод. указания. – Самара: Центр новых информ. технологий Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 1 электр. опт. диск (CD ROM).

Подписано в печать 20.05.2010 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов
