

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2006 И.Н. Крупенич, В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, А.Ю. Ткаченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Описывается базовый вариант автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей, которая предназначена для термогазодинамического проектирования двигателя, а также его газодинамической доводки.

На кафедре теории двигателей летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета разработан базовый вариант автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей, которая предназначена для термогазодинамического проектирования двигателя, а также его газодинамической доводки. Основной целью разработки системы является повышение эффективности, сокращение времени создания двигателя и уменьшение стоимости его жизненного цикла.

Она включает следующие подсистемы:

- проектного расчета АСТРА-ПР;
- расчета характеристик АСТРА-ВСХ;
- оптимизации проектных параметров АСТРА-ОПТ;
- идентификации параметров АСТРА-ИД;
- проектирования проточной части АСТРА-ТК.

Структура автоматизированной системы и возможности обмена данными между подсистемами представлены на рис. 1.

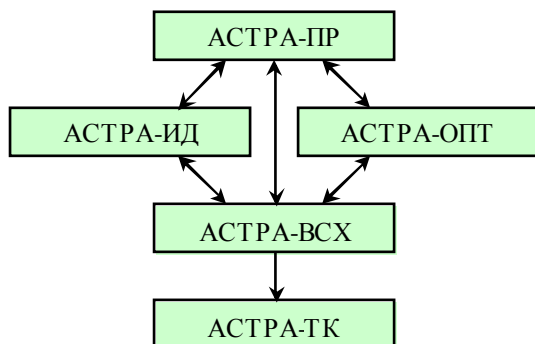


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы АСТРА

Предполагается, что в систему АСТРА будут включены разработанные на кафедре подсистемы газодинамического проектиро-

вания компрессора КОМПР и турбины ТУРБ.

**Подсистемы АСТРА-ПР, АСТРА-ВСХ, АСТРА-ОПТ, АСТРА-ИД.**

В подсистемах АСТРА-ПР, АСТРА-ОПТ, АСТРА-ИД реализованы термогазодинамические модели проектного расчета ГТД (двигателя с заданными площадями характерных сечений), подсистема АСТРА-ВСХ, кроме того, дополнена термогазодинамическими моделями выполненного ГТД (двигателя с заданными площадями характерных сечений). Подсистемы обладают возможностью расширения перечня рассчитываемых моделей ГТД, что обеспечено модульным принципом построения системы АСТРА.

Базовые модули в данных подсистемах соответствуют основным узлам двигателя и описывают модели происходящих в них процессов. К базовым относятся следующие модули:

- «Полетные условия. Тип топлива»;
- «Входное устройство»;
- «Компрессор»;
- «Вентилятор»;
- «Камера сгорания»;
- «Турбина»;
- «Свободная турбина»;
- «Переходный канал»;
- «Камера смешения»;
- «Форсажная камера»;
- «Коническое сопло»;
- «Сопло Лавалья»;
- «Диффузорное выходное устройство»;
- «Винт»;
- «Основные данные двигателя».

Совокупность базовых модулей, с указанием последовательности их расчета и порядка передачи значений параметров между

ними представляет собой термогазодинамическую модель ГТД конкретной схемы.

В настоящее время в системе АСТРА реализованы модели ГТД следующих типов и схем:

- одновальный ТРД;
- двухвальный ТРД;
- одновальный ТРДФ;
- двухвальный ТРДФ;
- двухвальный ТРДД;
- трехвальный ТРДД;
- двухвальный ТРДДсм;
- трехвальный ТРДДсм;
- двухвальный ТРДДФсм;
- трехвальный ТРДДФсм;
- одновальный ТВД;
- двухвальный ТВД;
- двухвальный ТВ(В)Д с однокаскадным компрессором и свободной турбиной;
- трехвальный ТВ(В)Д с двухкаскадным компрессором и свободной турбиной;
- двухвальный ТВАД с однокаскадным компрессором и свободной турбиной;
- трехвальный ТВАД с двухкаскадным компрессором и свободной турбиной;
- четырехвальный ТВАД с трехкаскадным компрессором и свободной турбиной.

Для описания процессов в узлах и элементах ГТД используются термодинамические соотношения или, так называемые,  $p$ - $i$ - $T$ -функции, представляющие собой полиномиальные зависимости изменения энтальпии и относительного давления рабочего тела от изменения температуры при изэнтропическом сжатии или расширении [7, гл.20]. Данный подход позволяет без последовательных приближений учитывать зависимость теплоемкости рабочего тела от его состава и температуры.

**Подсистема проектного расчета АСТРА-ПР** предназначена для выполнения проектного расчета и анализа закономерностей изменения удельных параметров ГТД. Исходными данными являются внешние условия, параметры рабочего процесса, КПД узлов и коэффициенты потерь. Проектный расчет в подсистеме выполняется по классической методике в последовательности, совпадающей с последовательностью течения рабочего тела в проточной части [4, гл.8]. В результате расчета определяются удельные параметры двигателя, удельная работа уз-

лов, расход воздуха через двигатель, давление и температура рабочего тела в характерных сечениях проточной части и соответствующие значения площадей этих сечений на расчетном режиме работы двигателя. Эти данные являются исходными для проектирования проточной части и узлов двигателя в подсистемах АСТРА-ТК, КОМП и ТУРБ, а также расчета дроссельных и высотно-скоростных характеристик двигателя в подсистеме АСТРА-ВСХ.

С помощью подсистемы АСТРА-ПР рассчитываются коэффициенты влияния, которые используются для оценки влияния параметров рабочего процесса, КПД узлов и коэффициентов потерь на удельные параметры двигателя.

Кроме того, подсистема АСТРА-ПР позволяет рассчитывать закономерности изменения удельных параметров проектируемого двигателя [4]. Для этого подсистема выполняет ряд проектных расчетов двигателя для заданного диапазона изменения выбранного параметра рабочего процесса. Результаты расчета представляются пользователю в графическом и табличном видах.

**Подсистема оптимизации проектных параметров АСТРА-ОПТ** предназначена для определения оптимальных значений параметров рабочего процесса, в том числе и по самолетным критериям эффективности. Оптимизация предшествует выбору параметров и последующему проектному расчету двигателя. Подсистема построена на основе тех же расчетных модулей, что и подсистема АСТРА-ПР, но включает расчет величин самолетных критериев эффективности и определения оптимальных параметров рабочего процесса по экстремуму выбранного критерия эффективности.

**Подсистема идентификации параметров АСТРА-ИД** решает задачу определения значений КПД узлов, коэффициентов потерь и других параметров по результатам испытаний двигателя. Подсистема включает расчетные модули подсистемы АСТРА-ПР, а также блок определения искомых параметров стандартными методами решения систем нелинейных уравнений.

**Подсистема расчета характеристик АСТРА-ВСХ** предназначена для анализа работы ГТД в широком диапазоне режимов

и внешних условий путем расчета его дроссельных, высотных, скоростных и климатических характеристик (рис. 2).



Рис. 2. Главное окно подсистемы АСТРА-ВСХ

Отличительной особенностью подсистемы является применение метода расчета характеристик, в котором выбор варьируемых параметров и вычисление их значений в очередном приближении основаны на закономерностях совместной работы узлов. В предлагаемом методе в качестве варьируемых параметров вместо степеней повышения давления в компрессорах, как это делается во многих аналогичных системах, выбраны степени понижения давления в турбинах, которые в основном диапазоне рабочих режимов изменяются несущественно. Это позволяет более точно задать начальное приближение и значительно уменьшить количество итераций.

Значения варьируемых параметров в очередном приближении определяются по формулам обратной связи, которые выведены на основании уравнений совместной работы узлов двигателя. Данный подход обеспечивает высокую устойчивость расчетов за счет использования логики поиска решения, связанного с конкретными особенностями физических процессов газотурбинного двигателя.

Базовые модули подсистемы АСТРА-ВСХ представляют собой соответствующие модули подсистемы АСТРА-ПР, дополненные алгоритмами термогазодинамического расчета выполненного ГТД. Введены модули, необходимые для решения системы нелинейных уравнений, описывающих совместную работу узлов, и организации «закольцовок», которые осуществляют

подбор значений варьируемых параметров как с использованием формул обратной связи, так и формальными математическими методами.

С помощью подсистемы АСТРА-ВСХ, перед началом расчета характеристик двигателя, необходимо выполнить его проектный расчет с учетом характеристик узлов. Результаты этого расчета используется в качестве начального приближения при расчете эксплуатационных характеристик.

На рис. 3 представлена информационная модель модуля «Двухвальный ТРДД», описывающего расчет характеристик двухвального двухконтурного двигателя с раздельным истечением газа.

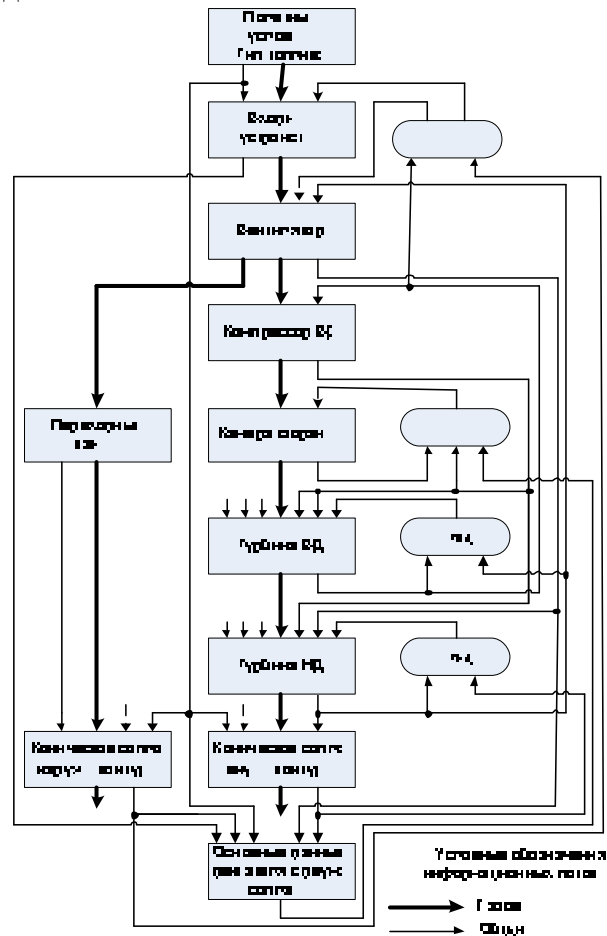


Рис. 3. Информационная модель модуля «Двухвальный ТРДД»

Она представляет собой совокупность базовых модулей с информационными связями между ними, которые организуют передачу значений параметров узлов.

Проектный расчет и расчет характеристик ГТД отличаются последовательностью использования базовых модулей. В проектном расчете последовательность вычисления

модулей линейная (рис. 4). При расчете характеристик, вычисление имеет итерационный характер, и каждая «закольцовка» соответствует подбору определенного варьируемого параметра (рис. 5).



Рис. 4. Последовательность расчета базовых модулей при проектном расчете двухвального ТРДД

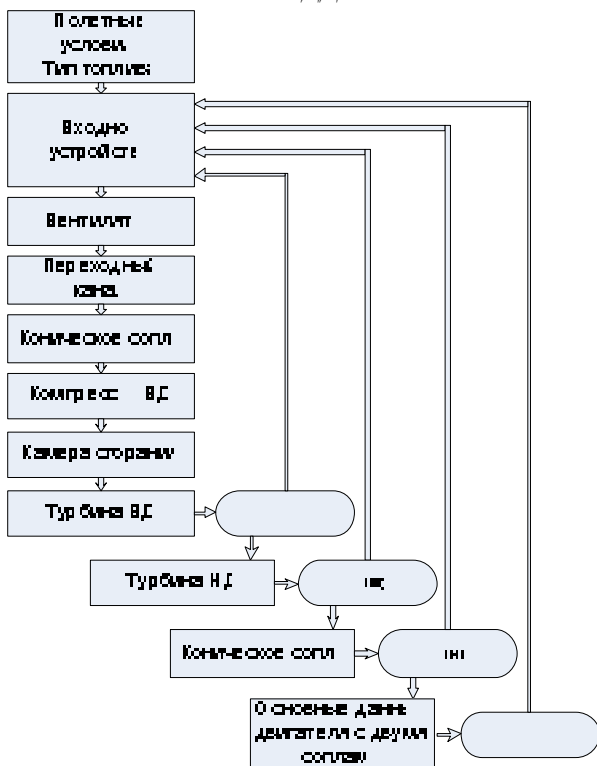


Рис. 5. Последовательность расчета базовых модулей при расчете характеристик двухвального ТРДД

Результатами расчета являются характеристики двигателя в графическом и табличном видах, а также линии совместной работы на характеристиках компрессоров

**Подсистема проектирования проточной части турбокомпрессора АСТРА-ТК** предназначена для предварительного выбора варианта проточной части, необходимого для проектирования компрессора и турбины.

При формировании проточной части приходится решать взаимосвязанные и противоречивые задачи, связанные с необходимостью обеспечения эффективной работы турбокомпрессора, его минимальных габаритов и массы, заданного ресурса двигателя. Правильное их разрешение является необходимым условием для дальнейшего успешного проектирования двигателя.

В научном плане она впервые была решена Холщевниковым К.В. [8], который предложил использование комплексного параметра, связывающего основные параметры турбокомпрессора с параметрами вращающейся его турбины. Сосунов В.А. и Цховребов М.М. [5, 6], обобщили опыт разработки двухконтурных двигателей, что позволило ввести новые критерии и предложить методологию проектирования проточной части. На основе указанных работ была разработана методика [7], которая легла в основу подсистемы вариантного проектирования проточной части турбокомпрессора авиационных ГТД.

Суть задачи заключается в необходимости определения основных диаметральных размеров и числа ступеней компрессора и турбины, которое, как известно, при прочих равных условиях обратно пропорционально квадрату окружной скорости:

$$\begin{cases} L_K = z_K \cdot \bar{H}_{к.ср} \cdot u_{к.ср}^2; & (1) \\ L_T = z_T \cdot u_{Т.ср}^2 \cdot \eta_T^* / (2 \cdot u_T^{*2}). & (2) \end{cases}$$

Окружная скорость, в свою очередь, зависит от среднего диаметра компрессора (турбины) и частоты вращения ротора:

$$\begin{cases} u_{к.ср} = \pi \cdot D_{к.ср} \cdot n; & (3) \\ u_{Т.ср} = \pi \cdot D_{Т.ср} \cdot n. & (4) \end{cases}$$

Максимально допустимая частота вращения ротора определяется запасом прочно-

сти рабочих лопаток турбины и целым рядом других факторов. Все перечисленные параметры взаимосвязаны, и простая система из четырех уравнений (1)...(4), которые будем называть уравнениями согласования, может быть решена по-разному, поскольку в ней девять неизвестных величин (которые будем называть параметрами согласования): частота вращения  $n$ , количество ступеней компрессора  $z_k$  и турбины  $z_T$ , их диаметральные размеры  $D_{к.ср}$  и  $D_{т.ср}$ , окружные скорости на среднем диаметре  $u_{к.ср}$  и  $u_{т.ср}$ , коэффициент напора компрессора  $\bar{H}_{к.ср}$  и параметр нагруженности турбины  $u_T^*$ , любые пять из них, следовательно, должны быть приняты как независимые переменные.

Для двухвального турбокомпрессора (в том числе для двухвального ТРДД без подпорных ступеней) число уравнений и неизвестных удваивается, а для двухвального ТРДД с подпорными ступенями прибавляется ещё два уравнения

$$z_{пс} = \frac{L_{пс}}{\bar{H}_{пс.ср} \cdot u_{пс.ср}^2} \quad (5)$$

$$u_{пс.ср} = \pi D_{пс.ср} n_{нд}, \quad (6)$$

и четыре ( $z_{пс}$ ,  $u_{пс.ср}$ ,  $\bar{H}_{пс.ср}$  и  $D_{пс.ср}$ ) неизвестных величины (частота вращения ротора подпорных ступеней равна частоте вращения ротора вентилятора).

Из сказанного следует, что при проектировании проточной части турбокомпрессора двигателя наиболее распространенной схемы – двухвального ТРДД с подпорными ступенями – приходится иметь дело с 22 параметрами согласования, из которых 12 являются независимыми переменными и ими необходимо задаваться в процессе расчета, а 10 определяются с помощью указанных выше формул. Такая задача решается не просто, особенно если иметь в виду, что в систему основных уравнений согласования не включены формулы для определения большого числа геометрических параметров, определяющих проточную часть турбокомпрессора. К таким параметрам относятся, прежде всего, шесть характерных величин (периферийный  $D_{п}$ , втулочный  $D_{вт}$ , сред-

ний  $D_{ср}$  диаметры, высота лопатки  $h_i$ , относительный диаметр втулки компрессора  $\bar{d}_{вт} = D_{вт}/D_{п}$  или отношение среднего диаметра к высоте лопатки турбины  $(D_{ср}/h)$  в сечениях на входе и выходе из каждого каскада компрессора и турбины. В процессе проектирования в каждом конкретном случае определенную величину из указанных целесообразно принять в качестве независимой переменной величины, число которых, следовательно, является неопределенно большим.

В этих условиях определение оптимальных параметров турбокомпрессора невозможно представить без проработки ряда вариантов его компоновки, то есть проектирование должно быть вариантным. Задача может быть решена только в рамках автоматизированной подсистемы, какой и является АСТРА-ТК, интерфейс которой представлен на рис. 6 и 7.

Ключевая задача согласования компрессора и турбины по окружным скоростям решается в ней отдельно для газогенератора и турбовентилятора.

Подсистема позволяет также решать задачу в упрощенной постановке, а именно при условии, что коэффициенты напора  $\bar{H}_{ср}$  для компрессора и нагруженности  $u_T^*$  для турбины задаются по умолчанию согласно рекомендациям.

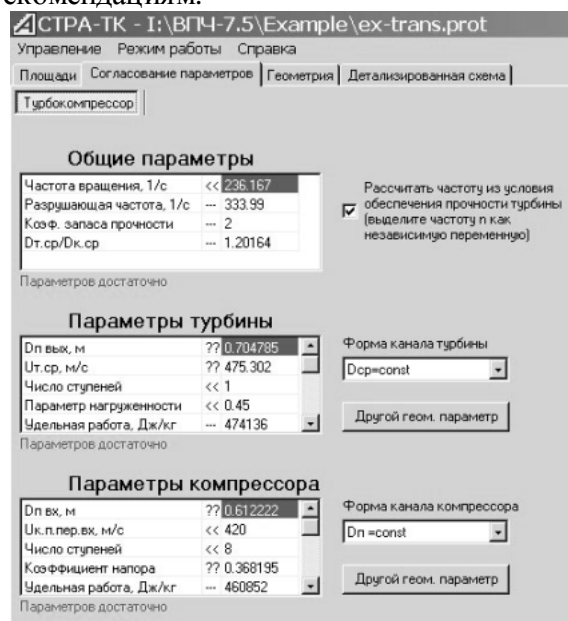


Рис. 6. Закладка «Согласование параметров»

**Турбина**

Длительность работы на режимах, эквивалентных максимальному, ч

Козф. формы

Козф. запаса

Материал лопатки РК

Температура на входе турбины, К

Температура на выходе турбины, К

последняя ступень охлаждаемая

Температура охлаждающего воздуха, К

Количество воздуха, отбираемого на охлаждение, %

Схема охлаждения

Безразмерная глубина охлаждения

Рис. 7. Окно выбора параметров, определяющих допустимую частоту вращения ротора

После решения задачи согласования выполняется детальный расчет геометрических параметров ступеней и выполняется построение детализированной схемы проточной части [3]. После выбора и расчета всех требуемых параметров детализированной схемы подсистема позволяет сохранить её в формате DXF для вывода в CAD-системах (КОМПАС, AutoCad, Unigraphics, ADEM, и др.) (см. рис. 8).

Предполагается, что в дальнейшем варианты проточной части будут сравниваться, а параметры оптимизироваться, в том числе по массе и критериям эффективности летательного аппарата.

Кроме того, данная система ориентирована на использование ее в учебном процессе в упрощенном варианте, что позволит студентам осуществлять вариантное проектирование, исследовать взаимосвязь параметров турбокомпрессора и наглядно оценивать их влияние на облик проточной части. Это позволяет получить более глубокие знания в области теории двигателей в процессе выполнения курсового и дипломного проектирования.

**Подсистемы проектирования компрессора КОМП и турбины ТУРБ** предназначены для расчета газодинамических и кинематических параметров проточной части, профилирования лопаточных венцов компрессора и турбины, а также определения их КПД.

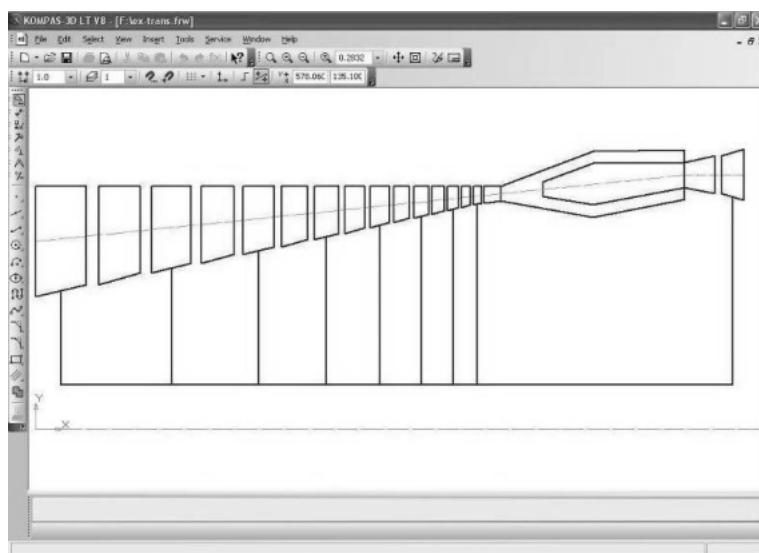


Рис. 8. Пример детализированной схемы меридионального сечения проточной части газогенератора в среде КОМПАС

Описанные подсистемы будут дополнены подсистемами расчета характеристик узлов двигателя.

Если принятые в проектном расчете КПД узлов не обеспечиваются, то весь процесс проектирования уточняется в следующем приближении, начиная с проектного расчета. Если не обеспечиваются заданные основные данные двигателя или самолетные критерии эффективности, то весь процесс повторяется, начиная с оптимизации и выбора других параметров рабочего процесса.

Базовый вариант системы внедрен в учебный процесс для выполнения курсовых работ по курсам теория и расчет авиационных двигателей, теория и расчет лопаточных машин и дипломного проектирования.

Таким образом, система АСТРА является комплексной, универсальной и включает весь цикл термогазодинамического проектирования газотурбинного двигателя, а также его термогазодинамической доводки.

### Список литературы

1. Дорофеев В.М. Термодинамический расчет воздушно-реактивных двигателей с помощью диаграмм  $\pi$ - $i$ - $T$ -функций. – Куйбышев: КуАИ, 1968.
2. Дружинин Л.Н., Швец Л.И., Малинина Н.С. Алгоритмы и подпрограммы расчета термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив в ГТД. – ЦИАМ, техн. отчет №8787, 1979. – 85 с.

3. Кузьмичев В.С., Трофимов А.А. Проектный расчет основных параметров турбокомпрессоров авиационных ГТД. Куйбышев: КуАИ, 1990. – 72 с.

4. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Основы теории ГТД. Кн.1. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн.2. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.

5. Научный вклад в создание авиационных двигателей. Кн. 1 (725 с.). Кн.2 (616 с.) / Под общей ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М.: Машиностроение, 2000.

6. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменчиков и др.; Под ред. С.М. Шляхтенко, В.А. Сосунова. М.: Машиностроение, 1979. - 432 с.

7. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / С.К. Бочкарев, И.М. Горюнов, В.С. Кузьмичев и др. Под общ. ред. В.В. Кулагина. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.

8. Холщевников К.В. Некоторые вопросы теории и расчета ТРД. М.: Оборонгиз, 1960. 118 с.

## **AUTOMATED SYSTEM OF GAS TURBINE ENGINES TERMOGAZDYNAMIC CALCULATION AND ANALYSIS**

© 2006 I.N. Crupenitch, V.S. Kuzmitchev, V.V. Kulagin, A.Ju. Tkatchenko

Samara State Aerospace University

The article describes the computer-aided system of GTE thermogasdynamic design and analysis ASTRA and its subsystems created for GTE designing and development.