

Д. А. Ахмедзянов, Ю. М. Ахметов, А. Б. Козловская, А. Е. Михайлов

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрены особенности построения поузловой имитационной математической модели ГТД на неустановившихся режимах работы. В разработанной в НИЛ САПР-Д кафедры авиационных двигателей УГАТУ системе имитационного моделирования DVIGwp произведен расчет динамической характеристики одновального ТРД с нерегулируемой геометрией проточной части при критическом режиме течения в сопловом аппарате турбины и реактивном сопле. Рассмотрены особенности полученной динамической характеристики одновального ТРД с нерегулируемой геометрией. Авторами показана возможность перехода математических моделей ГТД на неустановившихся режимах от поэлементной имитационной к упрощенной многорежимной модели и уравнению движения ТРД при линейном анализе. Проведен анализ возможностей применения динамической характеристики при проектировании систем автоматического управления авиационных ГТД. *Авиационные двигатели; динамическая характеристика; имитационное моделирование*

Современные технологии в машиностроении и энергетике, в том числе в авиадвигателестроении, развиваются в направлении повышения степени автоматизации и все более широкого использования программных средств. Среди них средства инженерного анализа (CAE), средства конструкторско-технологического проектирования (CAD/CAM) и управления данными проекта (PDM), которые являются необходимым элементом в технологии проектирования, доводки, поддержки в эксплуатации авиационных двигателей. Сложившаяся в последнее время ситуация в области проектирования и эксплуатации тепловых двигателей и энергетических установок делает необходимым разработку и внедрение новой методологии, новых методов и средств на основе компьютерных систем, позволяющих повысить качество, уменьшить затраты времени, труда и других ресурсов.

В развитии работ в области САПР авиационных двигателей имеется четкая тенденция по совершенствованию математических моделей ГТД, которые достаточно полно отражают основные термогазодинамические процессы в проточной части и обеспечивают удовлетворительную точность расчета. Разработка методов и средств имитационного моделирования неустановившихся режимов работы ГТД совместно с элементами систем управления способствует не только улучшению проектных характеристик авиационных ГТД, но и сокращению сроков и затрат на их создание и доводку

[3, 10]. Современный газотурбинный двигатель представляет собой сложную нелинейную динамическую систему с взаимным влиянием газодинамических и теплофизических процессов, протекающих в его узлах. Процессы в двигателе являются нестационарными по времени и условиям эксплуатации, а для отдельных конструктивных схем имеют переменную структуру. Функционирование двигателя происходит при постоянном действии внутренних возмущений и практически во всем эксплуатационном диапазоне внешних условий – на переходных режимах работы.

Способность авиационных двигателей быстро изменять режим работы – их важнейшая эксплуатационная характеристика. Она в значительной степени определяет такие качества летательного аппарата, как быстрота запуска двигателя и готовность к полету, маневренность и безопасность в критических ситуациях, эффективность при ведении воздушного боя [1, 2, 13, 14].

Учитывая роль неустановившихся режимов в жизненном цикле ГТД, их влияние на выбор параметров, законов управления, на работоспособность и техническое состояние, сложность описания и анализа процессов, происходящих в компрессоре, камере сгорания и других узлах ГТД, наличие жестких ограничений (по располагаемым запасам устойчивости компрессора, бедному и богатому срыву в КС, границам запуска и допустимому уровню температуры газов перед турбиной), а также существенное влияние внешних возмущений на работоспособность ГТД, проблема исследования неустановившихся режимов является чрезвычайно важной и актуальной.

Настоящая работа посвящена исследованию динамической характеристики одновального ТРД с нерегулируемой геометрией в системе имитационного моделирования (СИМ) авиационных ГТД на установившихся и неустойчивых режимах работы DVIGwp [4].

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В рамках внедрения в процесс проектирования CALS-технологий и имитационного моделирования исследование динамических характеристик ГТД следует проводить на верифицированных «гибких» математических моделях, что позволит значительно сократить временные сроки и затраты на различных этапах проектирования. Структура и точность применяемой математической модели определяются характером задачи, для решения которой они применяются. Существующие математические модели могут быть подразделены на группы [1, 3].

Поэлементная имитационная математическая модель строится по принципу достаточно точного описания процессов в основных узлах и агрегатах ГТД; позволяет решать большой круг задач, таких как расчет параметров на установившихся режимах работы (дрессельные, климатические, высотно-скоростные характеристики и др.); воспроизведение переходных процессов на запуске, приемистости, при включении форсированного режима, при действии внешних и внутренних возмущений; прогнозирование характеристик двигателя в нештатных ситуациях; проверка влияния различных способов управления на эксплуатационные свойства двигателя; сопровождающее моделирование натурных испытаний с целью получения недостающей информации.

Многорежимная упрощенная математическая модель строится на основе динамической  $\dot{n} = f(G_T, n)$  и дрессельных характеристик двигателя. При помощи такой модели аппроксимируют результаты, полученные по поэлементным имитационным моделям, либо экспериментальные характеристики. Она позволяет моделировать работу двигателя в широком диапазоне режимов и условий полета, расчеты переходных процессов выполнять в реальном масштабе времени, моделировать работу двигателя в составе тренажера в интегральных САУ, проводить сопряжение модели двигателя с реальной аппаратурой.

Линейная математическая модель, воспроизводящая нестационарные процессы в двигателе в некоторой окрестности расчетного режима, строится путем линеаризации различными ме-

тодами уравнений исходной нелинейной поэлементной модели, либо путем линеаризации многорежимной упрощенной модели, либо аппроксимацией экспериментальных динамических характеристик (переходных функций или частотных характеристик).

Регрессионные математические модели строятся в виде регрессионных зависимостей между входными и выходными параметрами двигателей, коэффициенты которых определяются на основе достаточно большого количества расчетной или экспериментальной информации. Модели предназначены, обычно, для решения частных задач, возникающих при исследовании САУ двигателей.

Нестационарная динамическая модель, воспроизводящая случайные процессы в проточной части двигателя (шумы). Модель предназначена для исследования работы САУ двигателя при действии случайных помех.

Наибольшее распространение получили поэлементные математические модели, как наиболее универсальные и наиболее полно отражающие физическую картину процессов, протекающих в двигателе на установившихся и неустойчивых режимах работы.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ ГТД

Вопросам математического описания рабочего процесса в авиационных ГТД посвящено множество работ [1, 5–10]. Расчет двигателя на неустойчивых режимах работы является наиболее сложной и общей задачей в теории рабочего процесса ГТД. Установившиеся режимы работы газотурбинного двигателя могут рассматриваться как частные случаи переходных процессов, при которых ускорения роторов равны нулю и полностью завершён прогрев деталей проточной части ГТД. Система уравнений, описывающая нестационарную работу ГТД, включает в себя как частный случай систему уравнений, характеризующую стационарные, равновесные режимы работы двигателя.

В общей постановке задача расчета ГТД на неустойчивых режимах работы чрезвычайно сложна и не нашла до сих пор в теории газотурбинных двигателей исчерпывающего решения. Наряду с обычными уравнениями баланса работ и расходов в элементах двигателей приходится рассматривать такие факторы, как газодинамическая и тепловая нестационарность, неполный и неравномерный прогрев деталей

в компрессорах и турбинах ГТД, нестационарное тепловыделение в камере сгорания и т. п.

При рассмотрении общей теории неустановившихся режимов работы газотурбинных двигателей с целью упрощения принимается в качестве допущения принцип квазистационарности, т. е. допускается, что характеристики элементов проточной части ГТД, полученные на установившихся режимах работы, остаются неизменными и на неустановившихся режимах работы газотурбинных двигателей. Сохраняются также известные в теории рабочего процесса ВРД выражения мощности компрессоров и турбин, понятия к.п.д. элементов и т. д. [8]. При этом предполагается бесконечно большая скорость перекладки регулируемых элементов проточной части ГТД. Таким образом, можно представить процесс работы газотурбинного двигателя и его элементов на неустановившихся режимах работы как ряд мгновенных установившихся (квазистационарных) состояний, для описания которых используются соотношения, разработанные в теории ВРД для исследования установившихся режимов работы.

Существуют различные подходы к построению математической модели ГТД на неустановившихся режимах. Например, в работах [6, 7] приведена поузловая математическая модель трехвального ТРДДФсм – наиболее сложной на данный момент структурной схемы ГТД. В математической модели двигателя процессы представляются системой нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Последовательным упрощением и модифицированием из представленной модели может быть получена математическая модель газотурбинного двигателя произвольной структурной схемы.

В работе [8] представлены основные предпосылки к построению универсальной поэлементной математической модели ГТД на неустановившихся режимах работы.

Математическая модель ГТД любой конструктивной схемы включает в себя полную систему уравнений, описывающих характеристики элементов, связь между элементами, законы изменения подачи топлива регулирующей автоматикой, законы управления органами механизации двигателя.

Характеристики элементов двигателя в задачах, рассматриваемых в квазистационарном представлении, обычно задаются через параметры подобия установившихся и неустановившихся режимов работы ГТД. В тех случаях, когда законы газодинамического, теплового или геометрического подобия не соблюдаются, мо-

гут быть введены в математическую модель дополнительные уравнения.

Рассмотрим уравнения связей между элементами для одновального ТРД – простейшей структурной схемы ГТД, позволяющей исследовать основные взаимосвязи между параметрами рабочего процесса.

Условия равенства физической частоты вращения роторов компрессора и турбины:

$$n_K = n_T. \quad (1)$$

Баланс мощностей компрессора и турбины (для установившихся режимов  $dn/dt = 0$ ):

$$N_T = N_K + \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot J_z \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (2)$$

В дальнейшем при записи уравнений математической модели и исследовании неустановившихся режимов работы ГТД выражения  $dn/dt$  и  $\dot{n}$  эквивалентны.

Условия равенства суммарных степеней повышения и понижения полного давления (при допущении полного расширения в реактивном сопле на всех режимах работы ГТД):

$$\pi_{ВХ} \cdot \sigma_{ВХ} \cdot \pi_K \cdot \sigma_T = \pi_T \cdot \pi_{СР}. \quad (3)$$

Условия равенства физических расходов газа на входе в компрессор и турбину:

$$\begin{aligned} \frac{A(k, R) \cdot p_{ВХ}^* \cdot F_{ВХ} \cdot q(\lambda_{ВХ})}{\sqrt{T_{ВХ}^*}} &= \\ &= \frac{A(k, R) \cdot p_T^* \cdot F_T \cdot q(\lambda_T)}{\sqrt{T_T^*}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Представленные четыре уравнения являются определяющими при нахождении рабочей точки на характеристиках узлов на установившихся и неустановившихся режимах работы одновального ТРД.

Количество уравнений связей в общем случае равно утроенному числу роторов (каскадов) плюс число контуров газотурбинного двигателя.

$$N_{ур} = 3 \cdot N_{рот} + N_{конт}. \quad (5)$$

С помощью уравнений связей (1), (2), (4) производится согласование каскадов компрессора и турбины. Наличие дополнительного контура (контуров) двигателя накладывает дополнительную связь, описываемую уравнением (3) – условие равенства степеней повышения и понижения полного давления в дополнительном канале (при конструктивной схеме ГТД с отдельными выходными устройствами) или условие равенства статических давлений в смесителе (для конструктивной схемы со смеси-

тельным устройством и общим реактивным соплом).

Уравнения связей между элементами двигателя обусловлены конструктивной схемой двигателя, наличием геометрического регулирования элементов проточной части ГТД, наличием отборов воздуха из проточной части и механической мощности от роторов. Например, при наличии в системе автоматического управления двигателем контура регулирования входного устройства в систему уравнений связей добавляется уравнение согласования газотурбинного двигателя с воздухозаборником.

Уравнения связей между элементами проточной части ГТД дополняют соотношения между входными и выходными параметрами отдельных элементов. Теория рабочего процесса ВРД базируется на основных законах термодинамики и газодинамики – уравнениях энергии, неразрывности, импульсов, уравнении состояния и т. п. Вопросы термогазодинамического расчета параметров отдельных узлов широко представлены в литературе, например [5, 11], и в данной работе детально не рассматриваются.

Рассмотрим уравнения характеристик элементов на примере одновального ТРД.

Характеристики воздухозаборника:

$$\pi_{ВХ} = f(M_{П}, G_{ВХ}); \sigma_{ВХ} = f(M_{П}, G_{ВХ}). \quad (6)$$

Характеристики компрессора:

$$\pi_K = f(G_{Впр}, n_{пр}), \eta_K^* = f(G_{Впр}, n_{пр}). \quad (7)$$

Характеристики камеры сгорания:

$$\sigma_{KC} = f(\lambda_K) \text{ и } \eta_z = f(\alpha). \quad (8)$$

Характеристики газовой турбины:

$$A_T = f(\pi_T, n_{пр}) \text{ и } \eta_T^* = f(\pi_T, n_{пр}). \quad (9)$$

Характеристики реактивного сопла:

$$\Phi_C = f(\pi_C) \text{ и } \mu_C = f(\pi_C). \quad (10)$$

Система уравнений газотурбинного двигателя на неустановившихся режимах замыкается с помощью уравнений, отражающих влияние на рабочий процесс ГТД системы регулирования.

Взаимосвязь параметров в узле двигателя на неустановившихся режимах работы в квазистационарной постановке:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial p}{\partial \tau}\right)_i &= \frac{p_i - p_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} = f(n_{пр}, \Delta G_{Tпр}), \\ \left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_i &= \frac{T_i - T_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} = f(n_{пр}, \Delta G_{Tпр}), \\ \left(\frac{\partial G}{\partial \tau}\right) &= \frac{G_i - G_{i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} = f(n_{пр}, \Delta G_{Tпр}). \end{aligned} \quad (11)$$

Представленный в зависимостях функционал отражает замыкание решаемой системы уравнений математической модели регулирующим и регулируемым параметрами основного контура регулирования двигателя.

Мгновенная частота вращения в течение переходного процесса определяется следующим образом:

$$n_i = \left(\frac{\partial n}{\partial \tau}\right)_i (\tau_i - \tau_{i-1}) + n_{i-1}, \quad (12)$$

Данное представление соответствует интегрированию методом Эйлера по времени во время переходного процесса.

### 3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИМ DVIGWP

Исследование динамической характеристики одновального ТРД производится в системе имитационного моделирования авиационных ГТД DVIGwp [4]. Система имитационного моделирования разработана в среде МетаСАПР САМСТО, разработанной в НИЛ САПР-Д кафедры АД УГАТУ. Особенности построения поузловой имитационной математической модели представлены в работах [3, 9, 10] и в данной работе детально не рассматриваются.

Расчетное исследование производится на индивидуальной модели одновального турбореактивного двигателя с нерегулируемой геометрией проточной части в СИМ DVIGwp.

Расчет динамической характеристики одновального ТРД производится в области положительных значений ускорения по частоте вращения ротора. Исследование производится при закрытой ленте перепуска воздуха в области повышенных (близких к максимальной) частот вращения ротора. В исследуемом диапазоне изменения частот вращения ротора и ускорения по частоте вращения ротора режим течения в сопловом аппарате турбины и в реактивном сопле является критическим.

Зависимости всех приведенных величин (параметров) двигателя от приведенной частоты вращения ротора и приведенного расхода топлива могут быть выражены графически для каждого из параметров  $x_i$  в виде сеток линий постоянных значений  $x_{iпр}$  в координатах графика  $n_{пр}$  (абсцисса) и  $G_{Tпр}$  (ордината). Такой график называется динамической характеристикой ТРД [12]. Расчет динамической характеристики производится в СИМ DVIGwp с использованием характеристик узлов турбореактивного двигателя, представленных на рис. 1.

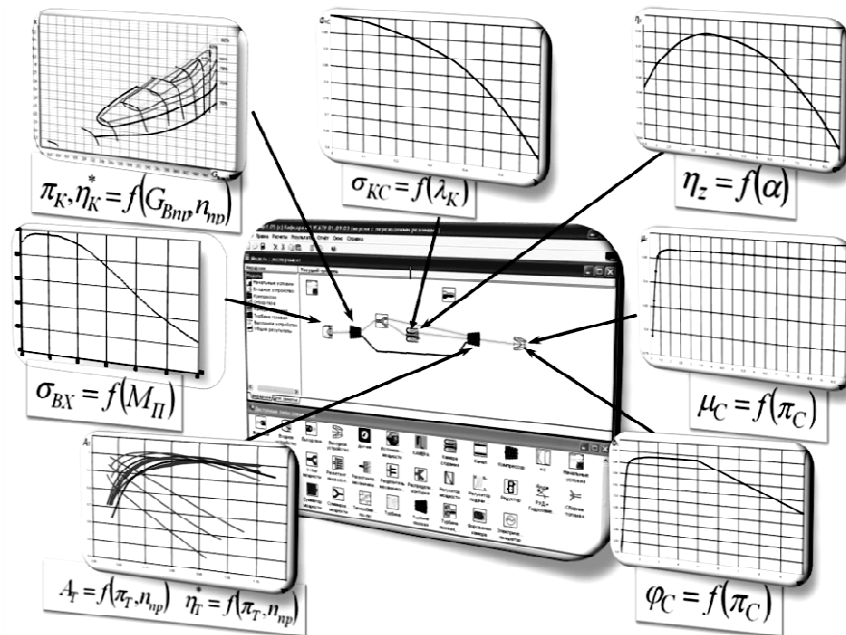


Рис. 1. Создание индивидуальной модели одновального турбореактивного двигателя в СИМ DVIGwp

Построение динамической характеристики одновального ТРД производится в СИМ DVIGwp за счет расчета совокупности преимуществ с законом расчета, представленным в табл. 1.

Закон расчета в СИМ DVIGwp

Варьируемый параметр	Поддерживаемый параметр
Приведенный расход воздуха на входе в компрессор, $G_{Bпр}$	Площадь критического сечения выходного устройства $F_{CKK}$
Степень повышения давления воздуха в компрессоре $\pi_K$	Относительная пропускная способность турбины $\overline{A_T}$
Приведенный расход топлива в камере сгорания $G_{Tпр}$	Ускорение по частоте вращения ротора турбокомпрессора $\dot{n}$

Перемещение через подпространства  $\tau_i$  (шаги по времени) может выполняться за счет табулирования значения времени в условиях расчета либо за счет задания фазовой траектории типа:  $dP_i/d\tau = f(P_i)$  (например, в компрессоре –  $dn/d\tau = f(n)$ ). На рис. 2–3 представлена динамическая характеристика одновального ТРД с нерегулируемой геометрией проточной части в виде зависимостей  $\dot{n} = f(n_{пр}, G_{Tпр})$   $G_{Tпр} = f(n_{пр}, \dot{n})$  в интервале частот вращения  $n_{пр} = 75\%..100\%$  при критическом режиме течения в сопловом аппарате турбины и реактивном сопле.

На динамической характеристике нанесены изолинии адиабатического полного КПД компрессора, полного давления воздуха за компрессором, граница предельных избытков топлива по запасу газодинамической устойчивости компрессора, а также линия допустимых избытков топлива при соблюдении гарантированной газодинамической устойчивости компрессора.

#### 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД

Динамическая характеристика ТРД представляет собой зависимости различных приведенных параметров двигателя от приведенного расхода топлива и приведенной частоты вращения ротора в виде сеток изолиний приведенных параметров  $x_{iпр}$  в координатах  $G_{Tпр}$  и  $n_{пр}$  [12].

На динамической характеристике одновального ТРД (рис. 2) приведена сетка ускорений по частоте вращения ротора, которая представляет собой графически выраженное уравнение  $\dot{n} = f(n_{пр}, G_{Tпр})$ , описывающее двигатель в рассматриваемой области его характеристик для всех условий полета как звено, входом которого является  $G_{Tпр}$ , а выходом  $n_{пр}$  (регулирующий и регулируемый параметры основного контура двигателя).

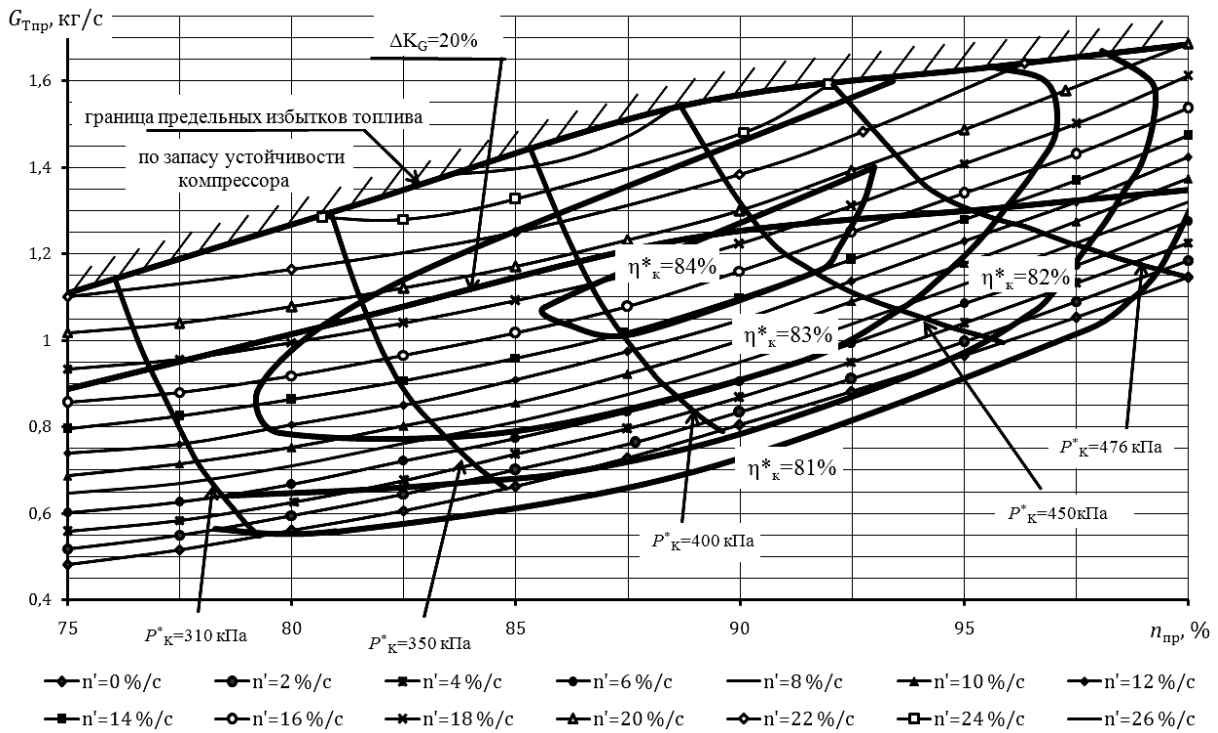


Рис. 2. Расчетная динамическая характеристика в виде зависимости  $\dot{n} = f(n_{пр}, G_{Тпр})$

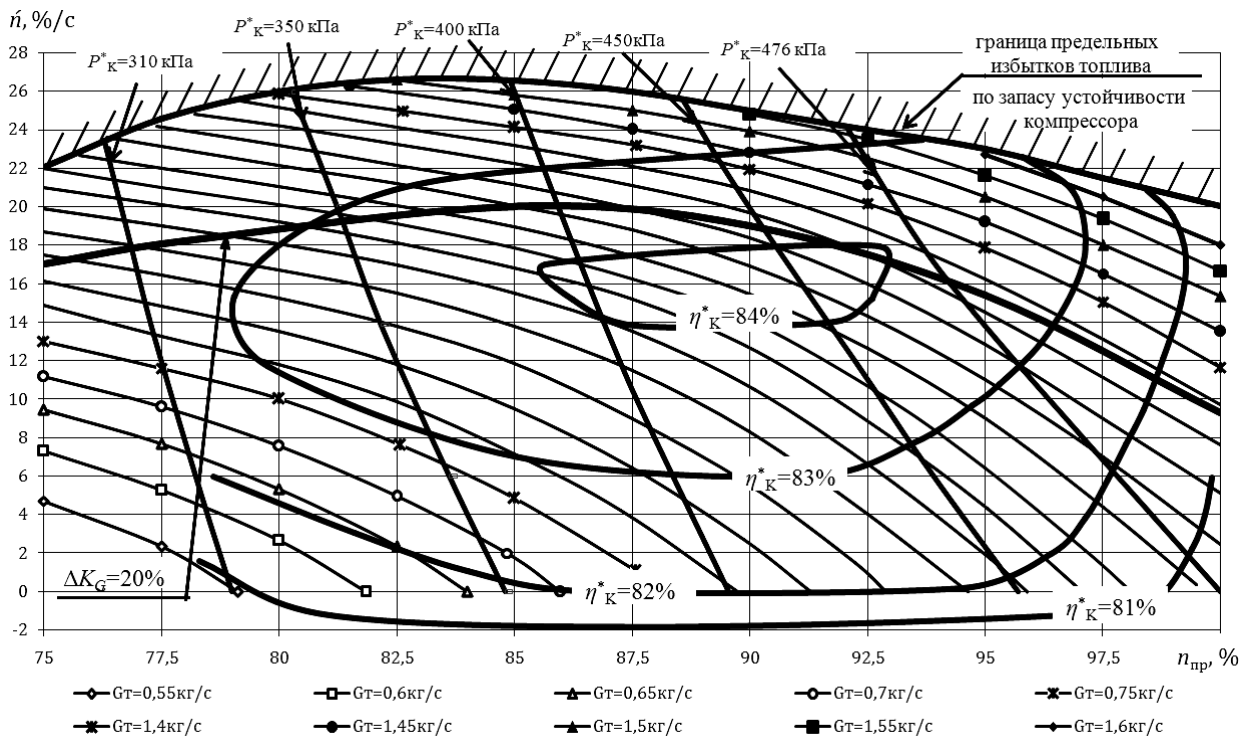


Рис. 3. Расчетная динамическая характеристика в виде зависимости  $G_{Тпр} = f(n_{пр}, \dot{n})$

С другой стороны уравнение  $\dot{n} = f(n_{np}, G_{Tnp})$  является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка. Таким образом, динамическая характеристика ТРД представляет собой область возможных решений уравнений динамики двигателя.

Подобное представление динамических свойств двигателя базируется на учете только одного главного аккумулятора энергии – инерционности вращающихся масс турбокомпрессора. При этом предполагается, что на установившихся и переходных режимах сохраняются неизменными геометрические размеры элементов проточной части газоздушного тракта, тепловое состояние элементов конструкции и пр.

На динамической характеристике (рис.2) представлена сетка изобар полного давления воздуха за компрессором  $p^*_k$  (величина  $p^*_k$  входит как сигнал во многие схемы регуляторов и необходима при расчете переходного процесса). Расчетный характер представленных результатов позволяет нанести на динамическую характеристику сетку изолиний полного адиабатического коэффициента полезного действия компрессора. На рис. 5 представлена характеристика компрессора с изолиниями полного адиабатического КПД компрессора. Сравнительный анализ кривых, представленных на рис. 2 и 5, позволяет выявить сходственное протекание изолиний полного адиабатического КПД компрессора на динамической характеристике ТРД и на характеристике компрессора. Коэффициент полезного действия компрессора является одним из наиболее существенных факторов, влияющих на избыточный момент турбины (совместно с основным регулирующим воздействием  $G_{Tnp}$ ) и изменяющимся в широких пределах (рис. 5). Таким образом, расчетная сетка изолиний адиабатического КПД компрессора и полного давления воздуха за компрессором  $p^*_k$  на динамической характеристике ТРД может быть использована при оптимизации траекторий переходных процессов совместно с характеристикой компрессора (рис. 5).

На динамической характеристике компрессора (рис. 2–4) представлена расчетная граница предельных избытков топлива по запасам газодинамической устойчивости компрессора (может быть получена переносом границы устойчивой работы с характеристики компрессора после получения расчетной сетки изолиний  $p^*_k$ ).

Область допустимых значений параметров двигателя в переходных процессах ограничивается линией допустимых избытков топлива при соблюдении гарантированной газодинамиче-

ской устойчивости  $\Delta K_G = 20\%$  (рис. 2–4) которая определяется следующим образом:

$$\Delta K_G = \frac{G_{Tnp\text{ гр}} - G_{Tnp}}{G_{Tnp\text{ гр}}} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Кривая  $\Delta K_G = 20\%$  определяет требуемый запас по приведенному расходу топлива относительно границы устойчивой работы компрессора на динамической характеристике ТРД. Ограничение вводится для обеспечения устойчивой работы компрессора при возможных внешних возмущениях, ошибках регулирования и т. п. Динамическая характеристика ТРД, выступая в виде упрощенной многорежимной математической модели двигателя, позволяет перейти к линеаризованной математической модели ТРД. В линейном анализе неустановившиеся процессы в двигателе рассматриваются в окрестностях равновесного режима работы. Для анализа используется уравнение движения ТРД:

$$T_d \frac{d\Delta n}{dt} + \Delta n = k_d \Delta G_T, \quad (14)$$

где  $T_d$  – постоянная времени двигателя,  $k_d$  – коэффициент усиления двигателя.

Коэффициент усиления двигателя по регулирующему воздействию  $G_{Tnp}$  определяется тангенсом угла наклона касательных к зависимости  $G_{Tnp} = f(n_{np})$  для установившихся режимов работы ( $\dot{n} = 0$ ):

$$K_d = \frac{\Delta n_{np}}{\Delta G_{Tnp0}}, \quad (15)$$

где  $\Delta G_{Tnp0}$  – приращение расхода топлива вдоль линии рабочих режимов при  $\dot{n} = 0$ ,  $\Delta n_{np}$  – приращение приведенной частоты вращения ротора вдоль линии рабочих режимов, соответствующее  $\Delta G_{Tnp0}$ .

Постоянная времени двигателя определяется в сечении  $G_{Tnp} = \text{const}$  следующим образом:

$$T_d = \frac{\Delta G_{T\text{ дин}}}{\Delta \dot{n}_{np}}, \quad (16)$$

где  $\Delta G_{T\text{ дин}}$  – приращение расхода топлива над установившимся режимом работы,  $\Delta \dot{n}_{np}$  – приращение ускорения по частоте вращения ротора, соответствующее  $\Delta G_{T\text{ дин}}$ .

Постоянная времени и коэффициент усиления двигателя являются переменными величинами по режимам работы ГТД. Таким образом, уравнение движения ТРД является дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами. Причем существует

взаимосвязь коэффициентов дифференциального уравнения  $K_D$  и  $T_D$  с переменными  $\Delta n_{np}$  и  $\Delta G_{Tnp}$ . Динамическая характеристика позволяет проанализировать изменение постоянной времени и коэффициента усиления двигателя в зависимости от избытка топлива и режима работы двигателя. Таким образом, уравнение движения ТРД выступает как частный случай динамической характеристики.

Расчетный характер проведенных исследований позволяет получить динамическую характеристику одновального ТРД в виде отличном от классического представления  $\dot{n} = f(G_{Tnp}, n_{np})$ .

На рис. 3 представлена расчетная динамическая характеристика одновального ТРД с нерегулируемой геометрией проточной части в виде зависимости  $G_{Tnp} = f(n_{np}, \dot{n})$ . Динамическая характеристика ТРД на рис.3 представляет собой фазовый портрет динамической системы, в качестве которой выступает газотурбинный двигатель. На рис. 4 представлена динамическая характеристика одновального ТРД с нерегулируемой геометрией в виде зависимости  $n_{np} = f(G_{Tnp}, \dot{n})$ .

Совокупность трех представленных расчетных динамических характеристик позволяет наиболее полно проводить исследование различных переходных процессов и проектирование систем автоматического регулирования одновальных ТРД.

### 5. ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Динамическая характеристика ТРД представляет собой одновременно графически выраженное уравнение связи между параметрами двигателя на всех установившихся и переходных режимах работы и наглядный «портрет» всех возможных состояний двигателя.

Динамическая характеристика представляет собой описание динамических свойств «свободного» двигателя, т. е. не связанного определенными законами управления объекта, все состояния которого равно допустимы [12].

Применение динамической характеристики позволяет решать следующие задачи управления газотурбинным двигателем [12]:

регулирование заданного установившегося режима;

регулирование протекания переходного процесса разгона;

поддержание заданного состояния основного контура ТРД на форсажных режимах;

автоматическое изменение положения органов переменной геометрии проточной части.

К применению динамической характеристики сводятся задачи исследования ГТД различных схем, не являющихся турбореактивными. В ГТД со свободной турбиной вследствие малости влияния свободной турбины на турбокомпрессор динамическая характеристика строится для турбокомпрессора так, как если бы он работал не на свободную турбину, а на реактивное сопло.

Исследование неустановившихся режимов работы двухвальных ТРД сводится к построению динамической характеристики аналогичной представленной на рис. 2. Трехвальный ТРД может быть представлен как двухвальный ТРД, нагруженный вместо сопла свободной турбиной. В случае если ГТД имеет теплообменник (регенератор), то состояние последнего сказывается на двигателе так, как если бы нагретый (горячий) теплообменник был равнозначен дополнительному топливу, сжигаемому в камере сгорания, а в случае, когда теплообменник холодный, подобное дополнение отсутствует [12]. Таким образом, исследование переходных процессов газотурбинных двигателей с теплообменником возможно на математической модели ГТД без теплообменника с введением эквивалентного расхода топлива в камере сгорания (эквивалентно введению эффективной площади реактивного сопла на форсированных режимах).

При регулировании процесса разгона ГТД с теплообменником эквивалентен запуску ГТД с присоединенным стартером-генератором, соответственно, необходимо в регулятор вводить поправку на состояние теплообменника либо осуществлять регулирование по параметрам за компрессором (в данном случае состояние теплообменника не оказывает влияния на программу регулирования) [12].

В приведенном выше виде (рис. 2–4) динамическая характеристика позволяет исследовать неустановившиеся режимы работы ГТД относительно простых схем при сохранении подобия его характеристик и процессов. Вопросы применения теории подобия при исследовании неустановившихся процессов в ГТД подробно рассмотрены в работе [12].



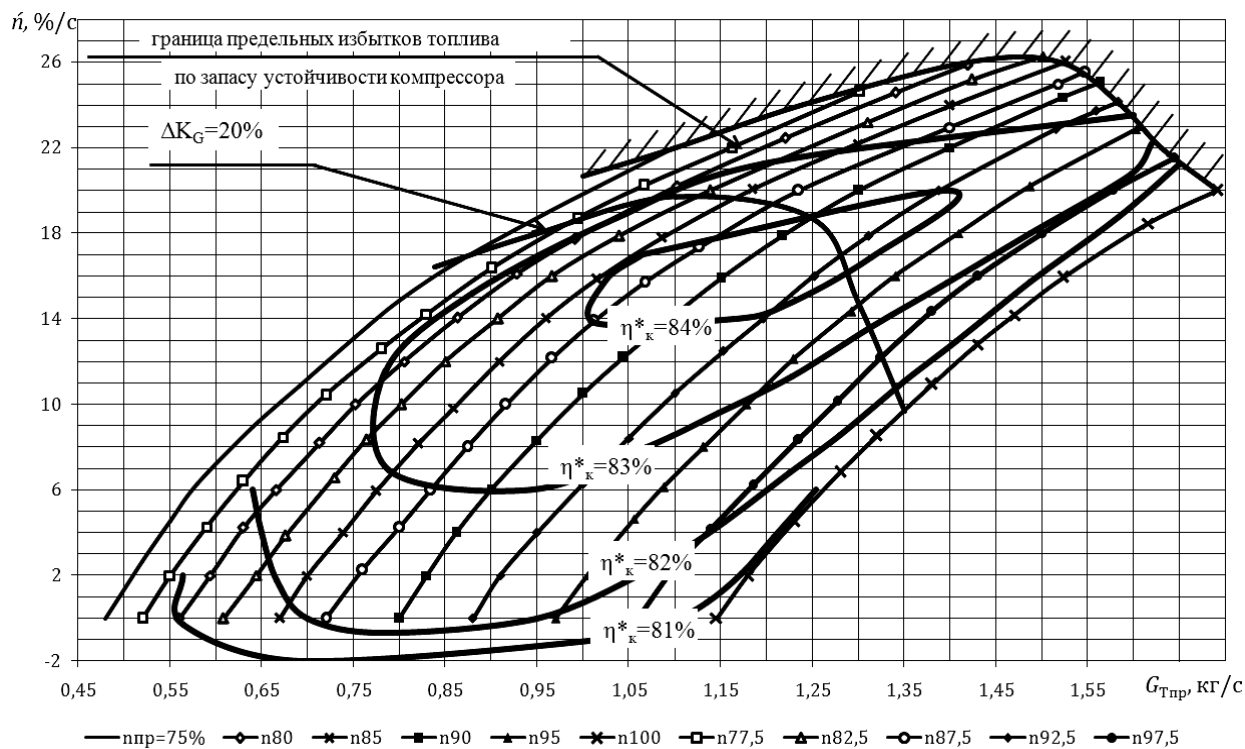


Рис. 4. Расчетная динамическая характеристика в виде зависимости  $n_{pp} = f(G_{Tpp}, \dot{n})$

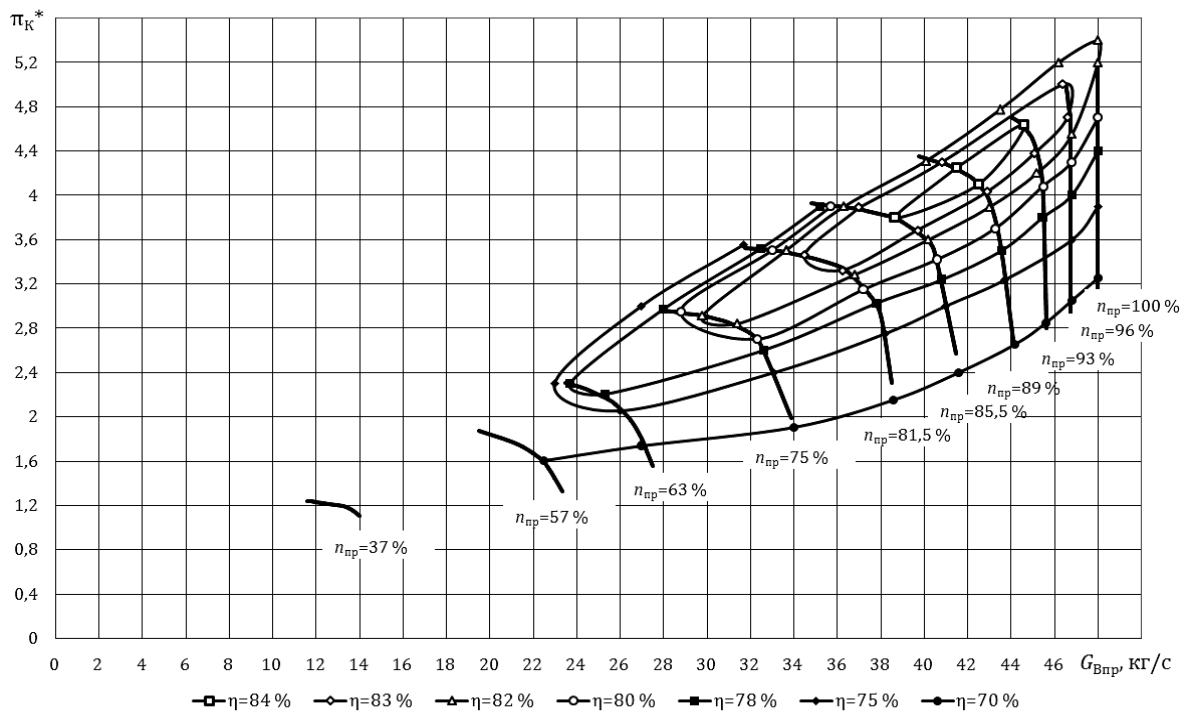


Рис. 5. Характеристика компрессора совместно с изолиниями полного адиабатического КПД

Подобие процессов в узлах ГТД нарушается при докритических режимах течения в сопловом аппарате турбины и реактивном сопле; изменении проходной площади реактивного сопла или так называемой эквивалентной площади реактивного сопла вследствие изменения эффективного расхода топлива в форсажную камеру сгорания; изменении характеристик турбокомпрессора вследствие его регулирования (клапанами или лентами перепуска воздуха и т. п.); полетах на больших высотах и малых скоростях вследствие деформации характеристик из-за влияния чисел  $Re$ ; в силу интенсивного теплоотвода в детали конструкции двигателя при быстропотекающих процессах или ступенчатых отборах мощности; при изменении полноты сгорания топлива в основной и форсажной камере сгорания; деформации характеристик турбокомпрессора, вызванной неравномерностью потока на входе в элемент газоздушного тракта и др. [6, 7].

Перечисленные выше факторы приводят к расслоению кривых динамической характеристики ГТД. Дополнительный учет каждого из перечисленных факторов приводит к значительному усложнению анализа динамической характеристики. При учете дополнительных факторов возможно пространственное представление динамической характеристики или использование «многолистных» динамических характеристик ГТД. В случае учета множества факторов, приводящих к нарушению подобия режимов течения в элементах ГТД, исследование неустановившихся процессов с применением динамической характеристики теряет свою практическую ценность.

## ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных авторами расчетных исследований рассмотрены основные принципы построения поузловой имитационной математической модели для исследования неустановившихся режимов работы авиационных двигателей и энергетических установок. Расчетное исследование проводилось в разработанной в НИЛ САПР-Д системе имитационного моделирования DVIGwr.

2. Авторами произведен расчет совокупности переходных процессов в широком диапазоне частот вращения и избытков топлива над установленным режимом работы. Проведенные исследования позволили получить динамическую характеристику одновального ТРД с регулируемой геометрией проточной части при критическом режиме течения в сопловом аппарате турбины и реактивном сопле.

3. В работе представлена динамическая характеристика одновального ТРД в виде зависимостей  $\dot{n} = f(G_{Tnp}, n_{np})$ ,  $G_{Tnp} = f(n_{np}, \dot{n})$  и  $n_{np} = f(G_{Tnp}, \dot{n})$ . Расчетный характер исследований позволил впервые получить на динамической характеристике сетку изолиний полного адиабатического КПД компрессора. Анализ представленных динамических характеристик и характеристики компрессора (рис. 2, 5) позволяет производить оптимизацию различных переходных процессов в области положительных значений ускорения по частоте вращения ротора.

4. Представленные на рис. 2–4 динамические характеристики представляют собой наиболее полный «портрет» всех возможных переходных процессов одновального ТРД в области  $\dot{n} > 0$ . Полученные расчетным образом на верифицированной математической модели динамические характеристики (рис. 2–4) могут быть использованы при проектировании электронных, гидромеханических и комбинированных систем автоматического управления одновальными турбореактивными двигателями с учетом переходов с одного регулятора на другой (переход с регулятора режима на регулятор разгона и наоборот).

5. В работе авторами показана возможность перехода математических моделей авиационных ГТД на неустановившихся режимах работы от поузловой имитационной модели к многорежимной упрощенной математической модели, и переход к линейному анализу вблизи точки установившегося режима посредством уравнения движения ТРД.

6. Отличительными особенностями современных авиационных двигателей являются сложность конструктивных схем и широкий эксплуатационный диапазон. Описанные особенности значительно усложняют исследование неустановившихся режимов работы современных ГТД с использованием динамических характеристик. В связи с этим особую актуальность приобретает применение поэлементных имитационных математических моделей рабочего процесса для исследования неустановившихся режимов работы ГТД.

7. Основным направлением проводимых в настоящее время работ является повышение адекватности математической модели рабочего процесса ГТД на неустановившихся режимах работы. Исследования проводятся с использованием разработанной в НИЛ САПР-Д среды МетаСАПР САМСТО. Концепция разработанной среды МетаСАПР позволяет проводить введение дополнительных факторов, которые на-

рушают подобие процессов в узлах ГТД последовательной «надстройкой» над используемой математической моделью рабочего процесса ГТД. Наиболее существенными факторами, нарушающими подобие процессов в узлах ГТД и влияющими на адекватность математической модели, являются учет нестационарного теплоотвода в элементы конструкции ГТД; учет изменения зазоров в лопаточных машинах; учет изменения полноты сгорания топлива в основной и форсажной камерах сгорания; деформация характеристик узлов турбокомпрессора при различных возмущениях на входе; деформация характеристик узлов турбокомпрессора в неавтономной области по критерию Рейнольдса.

8. Рассмотренная математическая модель рабочего процесса ГТД на неустановившихся режимах работы не учитывает значение передаточного запаздывания в камере сгорания ( $\tau_{\text{перед. зап.}} = 0,05..0,1$  с), которое необходимо вводить при анализе устойчивости систем автоматического управления на бесфорсажных и форсажных режимах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добрянский Г. В., Мартянова Т. С.** Динамика авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
2. **Черкасов Б. А.** Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
3. **Тунаков А. П., Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** САПР газотурбинных двигателей. Уфа: УГАТУ, 2005. 272 с.
4. Система термогазодинамического моделирования газотурбинных двигателей на переходных режимах работы DVIGwr: свид. об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ № 2004610868. / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Е. С. Власова. М.: Роспатент, 2004.
5. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. М.: МАИ, 2003. 688 с.
6. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
7. **Шевяков А. А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. М.: Машиностроение, 1970. 660 с.
8. **Сосунов В. А., Литвинов Ю. А.** Неустановившиеся режимы работы авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
9. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Д. А. Ахмедзянов [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2003. 162 с.
10. **Ахмедзянов Д. А.** Термогазодинамическое моделирование авиационных ГТД: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 158 с.
11. **Кулагин В. В.** Теория расчет и проектирования авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термодинамический анализ. Кн. 1. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. Кн. 2. М.: Машиностроение, 2002. 616 с.
12. **Любомудров Ю. В.** Применение теории подобия при проектировании систем управления газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1971. 198 с.
13. **Ахметов Ю. М.** Некоторые вопросы проектирования систем автоматического управления разгоном ГТД: дис. канд. техн. наук. Уфа: ОКБ при УМЗ, 1977. 157 с.
14. **Аксельрод С. Е.** Основы регулирования авиационных двигателей: учебное пособие. Уфа: УАИ им. Орджоникидзе, 1981. 89 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Ахмедзянов Дмитрий Альбертович**, проф. каф. авиац. двигателей, зам. декана ФАД. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установк. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиац. ГТД на уст. и неуст. режимах, САПР авиац. ГТД.

**Ахметов Юрий Мавлютович**, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. НИИТ. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1959). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем управления энергоустановок.

**Козловская Александра Борисовна**, асп. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. процессов в компрессорах авиац. ГТД с использованием имитационного и 3D-CAD/CAE-моделирования.

**Михайлов Алексей Евгеньевич**, асп. той же каф. Дипл. инж. по авиац. двиг. и энерг. установкам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. раб. процессов ГТД на уст. и неуст. режимах работы.