

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГТД

© 2011 В. М. Кофман

Уфимский государственный авиационный технический университет

С помощью математических моделей ГТД расчёта неустановившихся режимов работы в квазистационарной постановке и с учётом газодинамических нестационарных факторов выполнено исследование влияния накопления массы и энергии рабочего тела в объёмах проточной части двигателя на изменение его параметров. Установлены критерии подобия и получены обобщенные зависимости изменения расхода, полного давления и температуры торможения от этих критериев.

*ГТД, неустановившиеся режимы, накопление массы и энергии.*

Повышение уровня параметров термодинамического цикла современных авиационных ГТД и увеличение скоростей их переходных процессов требует дальнейшего усложнения систем регулирования двигателей и совершенствования применяемых при проектировании и доводке ГТД методов расчёта и анализа их характеристик.

Одним из эффективных инструментов проектирования доводки ГТД является реализованная на ЭВМ его математическая модель (ММ) на неустановившихся режимах работы.

В настоящее время известны два методологических подхода, применяемых при расчёте неустановившихся режимов работы ГТД с помощью нелинейных поэлементных математических моделей.

Первый подход базируется на известной гипотезе квазистационарности [1], согласно которой принимаются следующие допущения:

- характеристики узлов ГТД, полученные по результатам их испытаний на специальных стендах или в системе ГТД на установившихся режимах, сохраняются неизменными и на неустановившихся режимах работы двигателя;

- при описании движения газа по проточной части ГТД используются уравнения неразрывности, энергии и количества движения для стационарного течения;

- не учитывается влияние нестационарного теплообмена между деталями проточной части ГТД и рабочим телом на изменение его параметров;

- не учитываются потери энергии в камерах сгорания, обусловленные нестационарным характером процесса горения;

- переходные процессы ГТД рассматриваются как совокупность мгновенных установившихся режимов.

Расчёт ускорения ротора ГТД выполняется по уравнению

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N_{\tau} - \frac{N_{\kappa}}{\eta_{\text{м}}} + \Delta N}{4\pi^2 \cdot J_p \cdot n}, \quad (1)$$

полученному из второго закона Ньютона для вращательного движения. Производная частоты вращения ротора рассматривается как некоторая алгебраическая величина. Задача расчёта неустановившихся режимов сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений методом итераций или Ньютона. Математическая модель ГТД в квазистационарной постановке позволяет производить расчёт параметров в частотном диапазоне, определяемом инерционными свойствами ротора двигателя (0...3 гц) [2].

Второй методологический подход отличается от первого учетом накопления массы рабочего тела в объёмах проточной части ГТД (в объёмах камер сгорания, реактивного сопла, между каскадами компрессоров и турбин). Учёт накопления массы рабочего тела производится в большинстве работ с помощью дифференциального уравнения

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{RT^*}{V} (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}) + \frac{p^*}{T^*} \frac{dT^*}{dt}, \quad (2)$$

полученного из уравнения состояния идеального газа с приближенной заменой статических давления и температуры на изоэнтропически заторможенные. Введение дифференциальных уравнений вида (2) при расчёте течения воздуха и газа по проточной части ГТД, с одной стороны, позволяет учесть накопление массы рабочего тела в объёмах проточной части ГТД, с другой –

упрощает логическую схему расчёта. Задача расчёта неустановившихся режимов сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка методом Эйлера или Рунге-Кутты с заданными начальными условиями (задача Коши). Интегрируемыми параметрами являются полное давление и температура газа. Параметры в правой части дифференциальных уравнений определяются путем последовательного решения нелинейных алгебраических уравнений.

Как при первом, так и втором методологических подходах расчёт производится в одномерной постановке для средних в каждом сечении проточной части ГТД параметров рабочего тела. Независимыми переменными при расчёте являются расход топлива в основную и форсажную камеры, площадь критического сечения реактивного сопла, положение элементов механизации компрессора или вентилятора.

Достоинством первого подхода является его методическое единство с ММ ГТД, предназначенными для расчёта установившихся режимов работы ГТД. Второй подход, по сравнению с первым, является более общим, так как позволяет учитывать нестационарные газодинамические процессы в объёмах проточной части и осуществлять моделирование неустановившихся режимов ГТД в более широком частотном диапазоне изменения параметров (0... 15 Гц) [2].

Одним из методических моментов, непосредственно связанных с применением второго подхода, является вопрос выбора шага интегрирования по времени. Как правило, при втором подходе для решения дифференциальных уравнений используется метод Эйлера, являющийся наиболее простым с точки зрения программной реализации на ЭВМ. При этом шаг интегрирования по времени, в пределах заданных ограничений по точности интегрирования и устойчивости решения, рекомендуется выбирать в 3...5 раз меньше минимальной постоянной времени дифференциальных уравнений математической модели (минимального времени пребывания газа в объёмах проточной части ГТД). Величина времени пребывания газа в объёмах основных и форсажных камер ГТД составляет 0,003...0,09с, что требует проведения расчёта с очень малым шагом по времени и приводит к увеличению затрат машинного времени. Как указывается в [2], для воспроизведения динамических процес-

сов в диапазоне 10...15 Гц необходимо, чтобы шаг интегрирования был не более 0,001с.

С повышением уровня параметров термодинамического цикла ГТД и увеличением скоростей их переходных процессов всё более возрастает проявление различных нестационарных факторов, оказывающих влияние на изменение параметров ГТД в этих процессах. Нестационарные факторы имеют различную физическую природу и их проявление есть следствие сложных нестационарных газодинамических, теплообменных, физико-химических и гидродинамических процессов, происходящих в ГТД. Виды нестационарных факторов, оказывающих влияние на параметры ГТД на неустановившихся режимах, разделены на группы и классифицированы в [3].

Исходя из физической сущности нестационарных факторов, их можно разделить на следующие группы: газодинамические, тепловые, термогазодинамические, термомеханические; термодинамические, химические, гидродинамические.

К группе газодинамических нестационарных факторов относятся:

- аккумуляция массы рабочего тела в объёмах проточной части ГТД (которая обусловлена сжимаемостью рабочего тела и изменением его массового заряда в объёме проточной части ГТД на неустановившихся режимах работы);

- аккумуляция энергии рабочего тела в объёмах проточной части ГТД (при известной аккумуляции массы аккумуляция энергии прямо пропорциональна запаздыванию на неустановившихся режимах изменения температуры газа на выходе из объёма по сравнению с её изменением на входе, происходящему из-за конечной скорости распространения возмущений вдоль потока),

- газодинамическая инерционность потока рабочего тела [4] (изменение температуры торможения и полного давления рабочего тела, обусловленное затратами энергии на преодоление его инерции при ускорении потока и использованием энергии инерционных сил потока при его торможении).

Несмотря на большее распространение второго методологического подхода, не исследовано какой количественный вклад вносит учёт накопления массы рабочего тела в объёмах проточной части современных ГТД на результаты математического моделирования их неустановившихся режимов работы. Проведение такой оценки с помощью мате-

математической модели ГТД, основанной на втором подходе, в явном виде невозможно, так как отбрасывание дифференциальных уравнений, учитывающих накопление массы, нарушает логическую последовательность расчета неустановившихся режимов. Оценка влияния объемов проточной части на результаты моделирования процессов приемистости и сброса газа ГТД может быть произведена путём сравнительного анализа результатов расчёта этих процессов, выполненных с помощью математических моделей ГТД, базирующихся на первом и втором методологических подходах.

С целью выявления количественных закономерностей накопления массы и энергии газа в объёмах проточной части и оценки вклада, который вносит учёт газодинамических нестационарных факторов в повышение точности расчёта неустановившихся режимов работы ГТД, методом математического моделирования проведены соответствующие исследования, основные результаты которых изложены в работах [3,5,6,7,8].

Исследование проводилось с помощью математических моделей однофазного ТРД в квазистационарной постановке и с учётом накопления массы и энергии газа в объёмах основной камеры сгорания и реактивного сопла. Выбор однофазного ТРД в качестве объекта исследования был обусловлен тем, что он является наиболее простым типом воздушно-реактивного двигателя и широко используется в теории ВРД для рассмотрения наиболее общих закономерностей его рабочего процесса. Моделирование проводилось при идентичной форме задания характеристик узлов двигателя, идентичной записи уравнений его рабочего процесса, идентичном учёте изменения свойств рабочего тела в зависимости от температуры и состава газа, при одинаковых внешних и начальных условиях и программе подачи топлива в камеру сгорания.

Учёт накопления массы рабочего тела в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла производился с помощью уравнения

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{kRT^*}{V} (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}) \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{\text{вх}}^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (3)$$

которое получено в [9] путем совместного решения дифференциального уравнения неразрывности для одномерного движения газа, уравнения адиабаты, уравнения состояния идеального газа и использования

соотношений для перехода от статических параметров газа к изоэнтропически заторможенным.

Учет накопления энергии рабочего тела в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла производился с помощью уравнения

$$\frac{dT^*}{dt} = \left[ \frac{kRT^*}{pV} (G_{\text{вх}} T_{\text{вх}}^* - G_{\text{вых}} T_{\text{вых}}^*) - \frac{T^{*2} R}{p^* V} (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}) \right] \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{\text{вх}}^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (4)$$

полученного путём совместного решения дифференциального уравнения энергии для одномерного движения газа при отсутствии подвода тепла на заданном участке, дифференциального уравнения неразрывности, уравнения состояния идеального газа и использования соотношений для перехода от статических параметров газа к изоэнтропически заторможенным.

Исследование влияния накопления массы рабочего тела в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла ТРД на изменение его параметров на неустановившихся режимах осуществлялось путём сравнительного анализа результатов расчётов переходных процессов двигателя, выполненных при одних и тех же исходных данных с помощью двух математических моделей ТРД: в квазистационарной постановке и с учётом накопления массы.

Исследование влияния накопления энергии в объёмах камеры и сопла ТРД на изменение его параметров на неустановившихся режимах осуществлялось с помощью математической модели, учитывающей накопление массы и энергии в этих объёмах путём сравнительного анализа результатов расчётов переходных процессов, выполненных как с учётом, так и без учёта накопления энергии в объёмах, соответственно, путём включения и исключения из алгоритма расчёта дифференциального уравнения (4) с помощью признака в исходных данных.

При расчёте переходных процессов ТРД с учётом накопления массы в объёмах камеры и сопла было исследовано влияние изменения величин этих объёмов на изменение параметров двигателя. При заданном шаге интегрирования по времени была рассчитана одна и та же приёмистость ТРД, с программой подачи топлива в камеру сгорания  $G_{\text{топ}} = f(t) = idem$ , сначала с заданными величинами объёмов камеры и сопла (исход-

ный вариант), а затем с поочерёдным изменением этих объёмов в одинаковое число раз.

Расчёты показали, что увеличение объёма камеры сгорания приводит в процессе приемистости ТРД в рассматриваемый момент времени к уменьшению полного давления газа перед турбиной, уменьшению расхода газа через критическое сечение соплового аппарата турбины и, соответственно, к уменьшению мощности турбины. Из-за этого рост частоты вращения ротора по времени в процессе приемистости, по сравнению с исходным вариантом, происходит с некоторым запаздыванием. Увеличение объёма сопла приводит к уменьшению в процессе приемистости ТРД полного давления газа за турбиной и расхода газа через критическое сечение сопла, к увеличению степени понижения давления газа в турбине и, следовательно, к увеличению её мощности. Рост частоты вращения ротора по времени, по сравнению с исходным вариантом, происходит с некоторым опережением. Таким образом, увеличение объёмов камеры сгорания и сопла при расчёте приемистости одновального ТРД приводит к противоположному влиянию на величину избыточной мощности турбины.

Анализ также показал, что при заданной скорости переходного процесса степень влияния изменения величины объёма на изменение расчётных параметров двигателя зависит от времени пребывания газа в объёме  $\tau$ :

$$\tau = \frac{p^* V}{GRT^*} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{\text{вх}}^2\right)^{\frac{1}{k-1}}} \quad (5)$$

Чем меньше время пребывания газа в объёме, тем меньше накопление массы рабочего тела в объёме. Зависимость накопления секундной массы рабочего тела в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла  $\delta G = ((G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}) / G_{\text{вх}}) \cdot 100\%$  от времени пребывания газа в них приведена на рис. 1.

На рис. 2 показано относительное изменение расхода рабочего тела по длине проточной части ТРД при заданной скорости переходного процесса и при изменении времени пребывания газа в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла, характеризующее нарушение баланса расхода рабочего тела, обусловленное накоплением массы рабочего тела в этих объёмах.

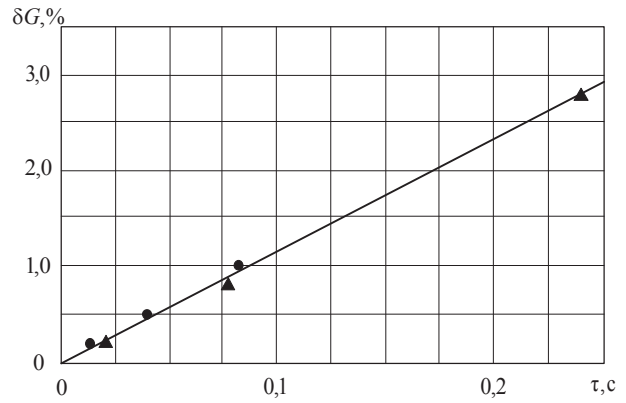


Рис. 1. Зависимость накопления секундной массы рабочего тела в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла от времени пребывания газа в них,

$$d\bar{G}_T/dt = 0,45 \text{ 1/c};$$

● – сопло; ▲ – камера сгорания

С увеличением скорости приемистости, характеризуемой темпом подачи топлива в камеру сгорания, накопление массы рабочего тела в объёмах проточной части двигателя возрастает (рис. 3).

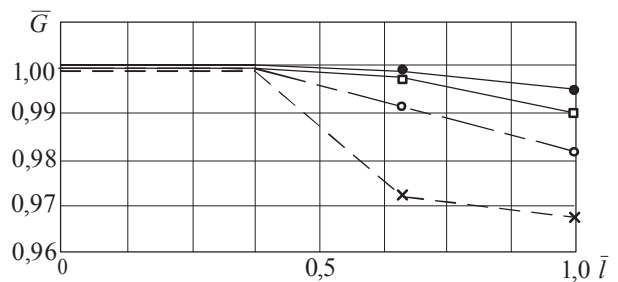
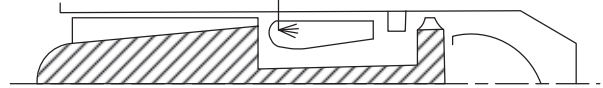


Рис. 2. Изменение относительного секундного расхода рабочего тела по длине ТРД:

$$d\bar{G}_T/dt = 0,45 \text{ 1/c}, \bullet - \tau_{\text{к.с}} = \tau_{\text{с}} = 0,02 \text{ с};$$

○ –  $\tau_{\text{к.с}} = \tau_{\text{с}} = 0,077 \text{ с}$ ; × –  $\tau_{\text{к.с}} = 0,237 \text{ с}$ ,  $\tau_{\text{с}} = 0,04 \text{ с}$ ,

□ –  $\tau_{\text{к.с}} = 0,022 \text{ с}$ ,  $\tau_{\text{с}} = 0,077 \text{ с}$

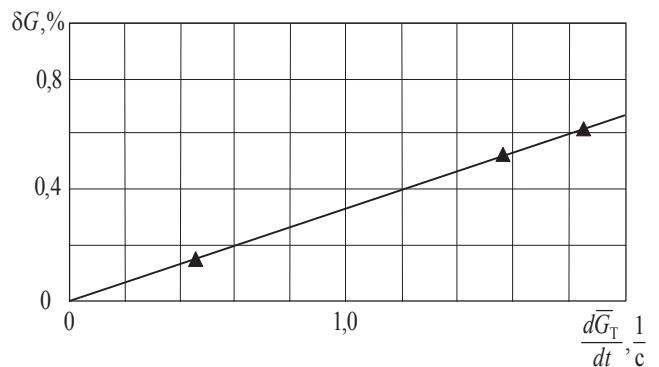


Рис. 3. Зависимость относительного секундного накопления массы газа в объёме камеры сгорания от относительного темпа подачи топлива в камеру

$$(\tau_{\text{к.с}} = 0,02 \text{ с})$$

Результаты расчёта приёмности ТРД, выполненного с помощью ММ в квазистационарной постановке и с помощью ММ учитывающей накопления массы в объёмах, показали, что при умеренной скорости переходного процесса и при времени пребывания газа в камере и сопле  $\tau=0,02$  с изменение параметров двигателя в процессе приёмности идентично (рис. 4).

При расчетах приёмности ТРД с учётом накопления энергии в объёмах выявлен следующий механизм влияния этого фактора на изменение параметров ТРД в этом процессе.

Учёт накопления энергии в объёме камеры сгорания приводит к понижению расчётного значения температуры газа перед турбиной и уменьшению её работы. Так как скорость изменения давления в объёме прямо пропорциональна величине температуры газа, то накопление энергии в камере сгорания сопровождается некоторым снижением полного давления на её выходе. Величина физического расхода газа через критическое сечение соплового аппарата турбины (при условии постоянства приведенного расхода) остаётся неизменной, так как увеличение плотности газа из-за понижения температуры компенсируется уменьшением плотности из-за снижения давления.

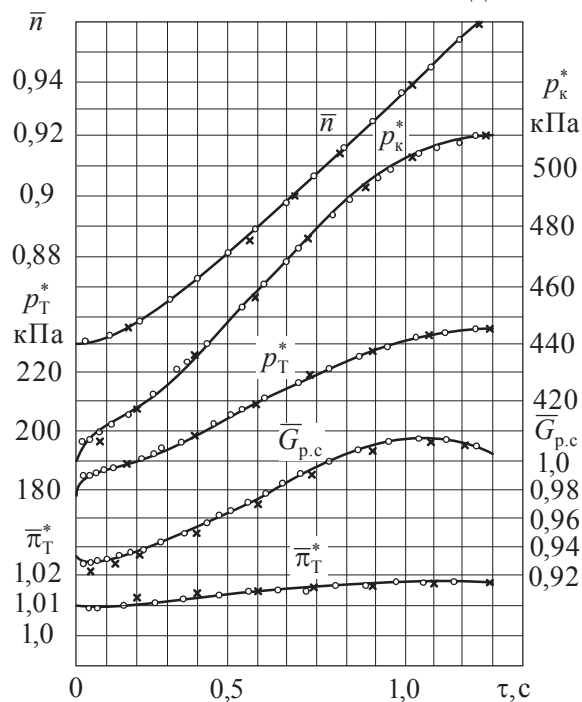


Рис. 4. Результаты расчёта параметров ТРД в процессе приёмности ( $d\bar{G}_T/dt=0,45$  1/с,  $\tau_{к.с} = \tau_c = 0,02$  с):  $\circ$  – расчёт в квазистационарной постановке,  $\times$  – расчёт с учетом накопления массы в объёмах камеры и сопла

Учёт накопления энергии в объёме сопла также приводит к понижению расчётных значений температуры торможения газа на выходе из объёма и полного давления в нём. При этом к эффекту накопления энергии в объёме сопла (понижение температуры и давления) суммируется эффект накопления энергии в камере. В результате уменьшается степень понижения давления газа в сопле и соответственно тяга двигателя. Уменьшение давления в объёме сопла, обусловленное накоплением энергии в нём, приводит к увеличению степени понижения давления газа в турбине и её работы. Таким образом, накопление энергии в объёме основной камеры сгорания ТРД (уменьшение температуры) приводит к уменьшению работы турбины, накопление энергии в объёме сопла (уменьшение давления) – к её увеличению.

Численные расчёты показали, что при заданной скорости переходного процесса запаздывание изменения температуры газа на выходе из объёмов увеличивается с ростом времени пребывания газа в них (рис. 5).

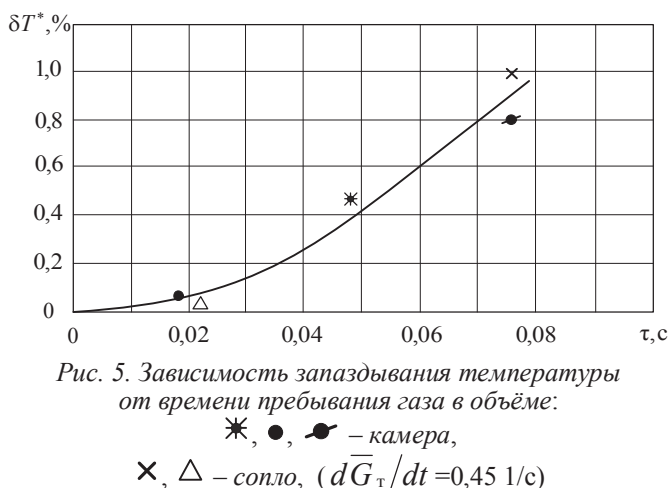


Рис. 5. Зависимость запаздывания температуры от времени пребывания газа в объёме:  
 $\ast, \bullet, \odot$  – камера,  
 $\times, \Delta$  – сопло, ( $d\bar{G}_T/dt=0,45$  1/с)

Увеличение скорости переходного процесса характеризуется величиной относительного темпа подачи топлива в камеру сгорания, а также усиливает эффект накопления энергии в объёмах (рис. 6).

Следует заметить, что учёт накопления энергии в объёмах камеры и сопла при расчёте приёмности ТРД приводит, по сравнению с расчётом без этого учёта, к снижению  $\pi_k^*$ , росту  $\pi_T^*$  и, как следствие, при  $G_T = f(t) = idem$  – к смещению рабочих точек в поле универсальной характеристики компрессора вправо от границы неустойчивой работы.

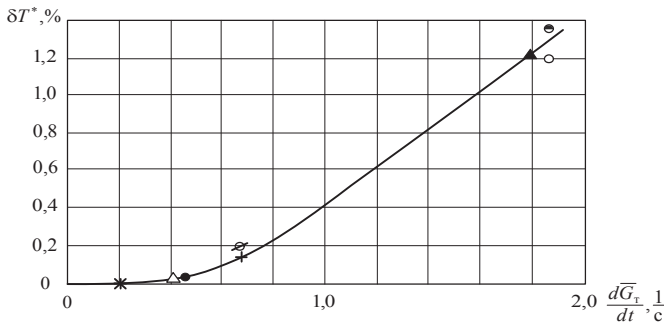


Рис. 6. Зависимость запаздывания температуры от относительного темпа подачи топлива в камеру сгорания ( $\tau_{к.с} = \tau_c = 0,02$  с):  
 ○, ●, ●, ⊗ – камера; +, ▲, ✱, △, – сопло

На основе анализа дифференциальных уравнений (3) и (4), описывающих процессы накопления массы и энергии рабочего тела в объёмах проточной части двигателя в [7], выведены критерии подобия

$$K_M = \frac{\tau \frac{dp^*}{dt}}{kp^*}, \quad K_E = \frac{\tau \frac{dT^*}{dt}}{kT^*},$$

от величин которых зависит относительное изменение параметров, обусловленное накоплением массы и энергии рабочего тела в объёмах ГТД на неустановившихся режимах.

По результатам математического моделирования переходных процессов ГТД с учётом и без учёта накопления массы и энергии получены обобщённые зависимости относительного изменения расхода газа, полного давления и температуры торможения от критериев подобия  $K_M$  и  $K_E$  [7], которые приведены на рис. 7, 8 и 9.

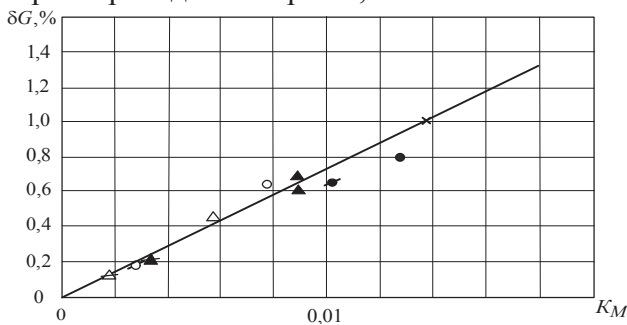


Рис. 7. Зависимость относительного накопления массы газа в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла ТРД в процессе его приёмности от критерия  $K_M$ :

- △, ▲, ▲, ○, ⊗ –  $\tau = 0,02$  с;
- △ –  $\tau = 0,032$  с; ● –  $\tau = 0,06$  с;
- ×, ● –  $\tau = 0,08$  с; ×, ▲, △, ▲, △ – сопло, ●, ●, ⊗, ○, ⊗ – камера;
- ▲, ○, –  $d\bar{G}_T/dt = 1,85$  1/с;
- ×, △, ▲, △, △, ●, ●, ⊗, ⊗ –  $d\bar{G}_T/dt = 0,45$  1/с

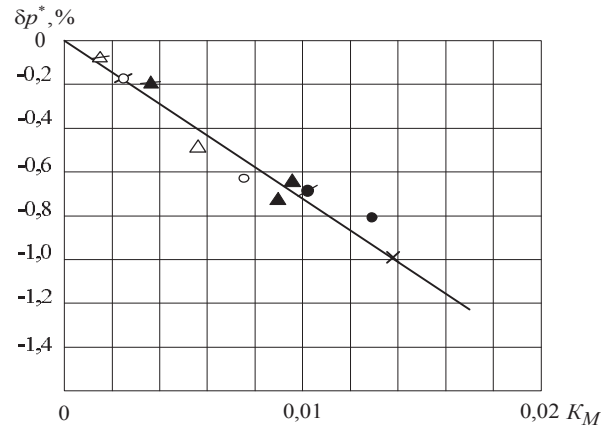


Рис. 8. Зависимость относительного изменения полного давления накопления массы газа в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла ТРД в процессе его приёмности от критерия  $K_M$  (обозначения см. рис 7)

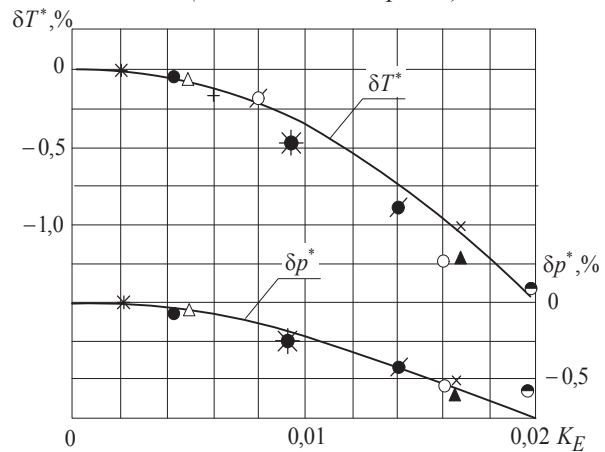


Рис. 9. Зависимость относительного изменения параметров газа, обусловленного накоплением энергии в объёмах ТРД в процессе приёмности от критерия  $K_E$ :

- ▲, +, ✱, △, × – сопло;
- ✱, ⊗, ●, ⊗, ●, ○ – камера;
- ×, ● –  $\tau = 0,08$  с; ✱ –  $\tau = 0,04$  с;
- , ✱, ⊗, +, ▲, △, ●, ○ –  $\tau = 0,02$  с;
- ✱ –  $d\bar{G}_T/dt = 0,2$  1/с;
- ✱, ×, ⊗, ●, △ –  $d\bar{G}_T/dt = 0,45$  1/с;
- ⊗, + –  $d\bar{G}_T/dt = 0,65$  1/с;
- , ▲, ○, –  $d\bar{G}_T/dt = 1,85$  1/с

Влияние учёта накопления массы на положение рабочих точек в поле универсальной характеристики компрессора однофазного ТРД при расчёте процесса его приёмности показано на рис. 10. Как следует из рис.10, эффект накопления массы газа в объёмах камеры сгорания и реактивного сопла ТРД в процессе его приёмности приводит к увеличению располагаемого запаса газодинамической устойчивости компрессора.

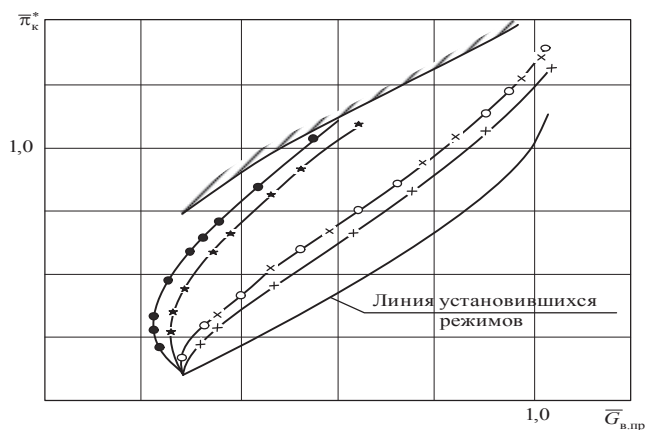


Рис.10. Изменение положения рабочих точек в поле универсальной характеристики компрессора ТРД при расчёте его приёмистости в квазистационарной постановке и расчёте с учётом накопления массы рабочего тела в объёмах проточной части:

- , ○ – расчёт в квазистационарной постановке;
- , ★ –  $d\bar{G}_T/dt = 1,85 \text{ л/с}$ ;
- ×, ★, + – расчёт с учётом накоплением массы,
- , ×, + –  $d\bar{G}_T/dt = 0,45 \text{ л/с}$ ;
- × –  $K_{M.кк.} = K_{M.c} = 0,003$ ;
- + –  $K_{M.кк.} = K_{M.c} = 0,013$ ;
- ★ –  $K_{M.кк.} = K_{M.c} = 0,007$

По результатам математического моделирования установлены условные пороговые значения критериев подобия  $K_M=0,001$  и  $K_A=0,002$ , при превышении которых учёт накопления массы и энергии оказывает влияние на результаты математического моделирования.

С целью определения значений критериев  $K_M$  и  $K_E$  в объёмах камер сгорания в высокоскоростных переходных процессах был проведён анализ параметров восьми отечественных и зарубежных двигателей (ТРД, ТРДФ, ТРДДФ), имеющих существенно различные геометрические характеристики. Диапазон изменения объёмов и параметров газа в основных и форсажных камерах этих двигателей на максимальном стендовом режиме приведён в табл. 1. Там же приведены принятые при анализе на основе имеющихся экспериментальных данных и результатов расчётов величины скоростей нарастания давлений и температур газа в объёмах в процессах приёмистости.

Таблица 1. Диапазоны изменения объёмов и параметров газа в основных и форсажных камерах ГТД

	V	$p^*$	$T_r^*$	$G_r$	$\tau$	$dp_r^*/dt$	$dT_r^*/dt$
	м <sup>3</sup>	кПа·10 <sup>-2</sup>	К	кг/с	с	$\frac{\text{кПа} \cdot 10^{-2}}{\text{с}}$	$\frac{\text{К}}{\text{с}}$
Основные камеры	0,057... 0,437	4,7... 15	1100... 1470	15... 150	0,003...0, 005	1,0...1,6	200... 300
Форсажные камеры	1,8...9,0	2,5... 4,0	900... 1100	60... 120	0,025... 0,09	0,5... 0,7	50... 150

Анализ параметров двигателей показал, что в основных камерах сгорания величины критериев  $K_M$  и  $K_E$  находятся в диапазоне  $K_M=0,0003...0,0013$ ,  $K_E=0,0005...0,001$ , то есть ниже условных пороговых значений. В объёмах форсажных камер величины критериев  $K_M$  и  $K_E$  изменяются в процессе приёмистости двигателя в диапазоне  $K_M=0,002...0,012$ ,  $K_E=0,001...0,009$ , то есть могут выходить за пределы условных пороговых значений. Наибольшее значение критериев  $K_M$  и  $K_E$  имеет место в форсажной камере ТРДДФ F101-X ( $K_M=0,012$ ,  $K_E=0,009$ ), объём которой составляет 9м<sup>3</sup>. Пренебрежение накоплением массы и энергии газа в ней при расчёте процесса приёмистости приводит к завышению величины давления в форсажной камере и занижению

степени понижения давления газа в турбине низкого давления примерно на 1%.

На основе обобщенных зависимостей, приведенных на рис.7,8 и 9 и метода малых отклонений была проведена оценка изменения работы турбины низкого давления ТРДФ и ТРДДФ, обусловленного накоплением массы и энергии газа в объёмах форсажных камер при приёмистости двигателей. Результаты оценки приведены на рис. 11 и 12.

Из рис. 11 и 12 следует, что изменение работы турбины в процессе приёмистости двигателя, обусловленное накоплением массы и энергии газа в объёме форсажной камеры при  $K_M = idem$  и  $K_E = idem$ , возрастает при уменьшении степени пониже-

ния давления газа в турбине и может достигать 1%.

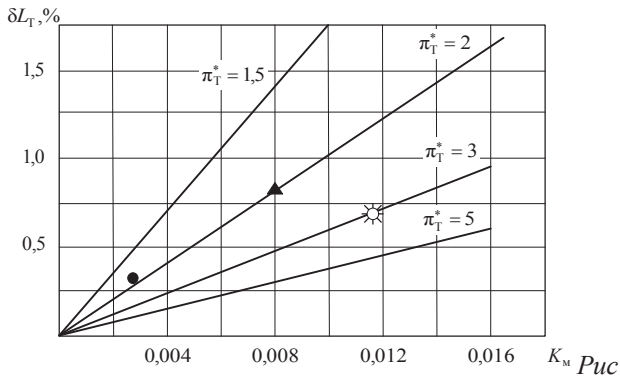


рис. 11. Изменение работы турбины низкого давления, обусловленное накоплением массы газа в объёме форсажной камеры в процессе приёмистости ТРДФ и ТРДДФ: ▲ – F404-GE-400,  $V_{ф.к} = 3,9 \text{ м}^3$ ; ● – P25-300,  $V_{ф.к} = 1,8 \text{ м}^3$ ; ☼ – F101-X,  $V_{ф.к} = 9 \text{ м}^3$

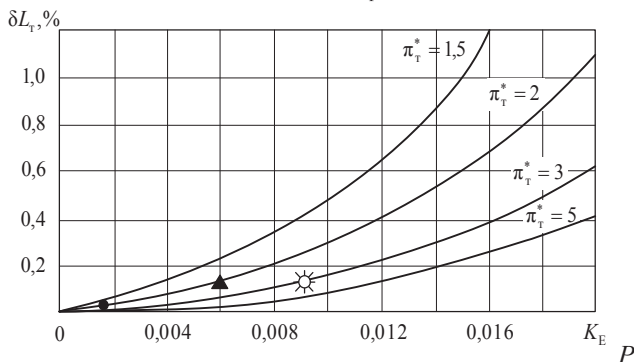


рис. 12. Изменение работы турбины низкого давления, обусловленное накоплением энергии в объёме форсажной камеры в процессе приёмистости ТРДФ и ТРДД (обозначение см. рис. 11)

Учет накопления массы и энергии газа в объёмах форсажных камер ТРДДФ при расчёте их приёмистости позволяет повысить точность оценки располагаемого запаса газодинамической устойчивости вентилятора как за счёт более точного определения соотношения частот вращения роторов из-за уточнения величины работы турбины низкого давления, так и за счет учёта изменения давления в форсажной камере, влияющего на величину степени повышения давления вентилятора.

Таким образом, проведенный анализ показал, что эффект накопления массы и энергии рабочего тела в высокоскоростных переходных процессах приёмистости ГТД имеет место в объёмах форсажных камер. При этом изменение параметров двигателя, обусловленное учётом накопления массы и энергии, не превышает 1%.

### Библиографический список

1. Акимов, В.М. Теория воздушно-реактивных двигателей [Текст] / [В.М. Акимов и др.], под ред. С.М. Шляхтенко. - М.: Машиностроение, 1975. - 508 с.
2. Добрянский, Г.В. Динамика авиационных ГТД [Текст] / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартынова - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
3. Аксельрод, С.Е. Классификация нестационарных факторов, влияющих на динамические характеристики ГТД Вопросы теории и расчёта рабочих процессов тепловых двигателей. [Текст] / С.Е. Аксельрод, В.М. Кофман // межвуз.науч.сб.- Уфа: УАИ, 1988. №12. - С.14-17.
4. Сосунов, В.А. Неустановившиеся режимы работы авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.А. Сосунов, Ю.А. Литвинов. - М.: Машиностроение, 1975. - 216с.
5. Аксельрод, С.Е. Об учёте сжимаемости рабочего тела при расчёте неустановившихся режимов газотурбинного двигателя [Текст] / С.Е. Аксельрод, В.М. Кофман // Изв. высш. учеб. заведений. Авиационная техника, 1980. - №1. - С.81-83.
6. Кофман, В.М. Об учёте накопления массы рабочего тела в газодинамических объёмах ГТД при расчёте его неустановившихся режимов [Текст] / В.М. Кофман // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов. сб.статей. Вып.22. Труды ЦИАМ, 1983. №1056. - С. 381-391.
7. Аксельрод, С.Е. Критериальный подход к оценке накопления массы и энергии рабочего тела в объёмах газозвдушного тракта ГТД при расчёте его неустановившихся режимов [Текст] / С.Е. Аксельрод, В.М. Кофман // Изв. высш. учеб. заведений. Авиационная техника, 1983. №1. - С.7-11.
8. Кофман, В.М. К вопросу учёта газодинамических нестационарностей в объёмах тракта ГТД при математическом моделировании его неустановившихся режимов работы [Текст] / В.М. Кофман // Вопросы теории и расчёта рабочих процессов тепловых двигателей: межвуз. науч. сб. - Уфа: УГАТУ, 2002. -№19. - С.13-22.
9. Kalberg, S.J., Sheppard D.E., King E.O., Baker J.R. AIAA 5th Propulsion Joint Specialist Conference[Text]/ S.J. Kalberg, D.E. Sheppard, E.O. King[etal] AIAA Paper. 1969. № 64-486. - P. 9-13.



**STUDYING THE INFLUENCE OF THE GAS-DYNAMIC NON-STATIONARY FACTORS  
ON THE MATHEMATICAL MODELLING OF THE GAS TURBINE ENGINES NON-  
SETUP WORK MODES**

© 2011 V. M. Kofman

Ufa State Aviation Technical University

With the help of the GTE (Gas turbine engine) calculation mathematical models of the non-setup work modes in the quasistationary setting and considering the gas dynamic non-stationary factors there has been carried out the research of the influence of working body mass and energy accumulation in the volumes of the gas turbine engine on its parameters change. There have been found out the general dependencies of the consumption change, total pressure and the stagnation temperature on these criteria.

*Gas turbine engine, non-steady regimes, accumulation mass and energy.*

**Информация об авторах**

**Кофман Вячеслав Моисеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел.: (347) 273- 08-44, (347) 284-68-42. E-mail: [stan@ufanet.ru](mailto:stan@ufanet.ru). Область научных интересов: Исследования в области идентификации и математического моделирования ГТД.

**Kofman Vyacheslav Moiseevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate professor at the department of aircraft engines of Ufa State Aviation Technical University. Phone: (347) 273-08-44, (347) 284-68-42. E-mail: [stan@ufanet.ru](mailto:stan@ufanet.ru). Area of research: Studies on identification and mathematical modeling of gas turbine engines.