

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

Кофман В.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет

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

Kofman V.M. 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.

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 цифровой ЭВМ его математическая модель (ММ) на неустановившихся режимах работы

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

Первый подход базируется на известной гипотезе квазистационарности [1], согласно которой характеристики узлов ГТД на неустановившихся режимах сохраняются неизменными, при описании движения газа по проточной части ГТД используются уравнения неразрывности, энергии и количества движения для стационарного течения, не учитывается влияние нестационарного теплообмена между рабочим телом и деталями проточной части ГТД на изменение его параметров. Задача расчета неустановившихся режимов сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений методом итераций или Ньютона. ММ ГТД в квазиста-

ционарной постановке позволяет производить расчет параметров в частотном диапазоне, определяемым инерционными свойствами ротора двигателя (0...3 гц) [2].

Второй методологический подход отличается от первого учетом накопления массы рабочего тела в объемах проточной части ГТД (в объемах камер сгорания, реактивного сопла, между каскадами компрессоров и турбин). Учет накопления массы рабочего тела производится в большинстве работ с помощью дифференциального уравнения, полученного из уравнения состояния идеального газа

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{RT^*}{V} (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}) + \frac{p^*}{T^*} \frac{dT^*}{dt} \quad (1)$$

с приближенной заменой статических давления и температуры на изоэнтальпически заторможенные. Введение дифференциальных уравнений вида (1) при расчете течения воздуха и газа по проточной части ГТД, с одной стороны, позволяет учесть накопление массы рабочего тела в объемах проточной части ГТД, с другой – упрощает логическую схему расчета. Задача расчета 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 расчет производится в одномерной постановке для средних в каждом сечении проточной части ГТД параметров рабочего тела. Независимыми переменными при расчете 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 расчета установившихся режимов работы ГТД. Второй подход, по сравнению с первым, является более общим, так как позволяет учитывать нестационарные газодинамические процессы в объемах проточной части и осуществлять моделирование неустановившихся режимов ГТД в более широком частотном диапазоне изменения параметров (0... 15 Гц) [2].

С повышением уровня параметров термодинамического цикла ГТД и увеличением скоростей их переходных процессов все 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]. К группе газодинамических нестационарных факторов относятся:

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

- аккумуляция энергии рабочего тела в объемах проточной части ГТД (при известной аккумуляции массы, аккумуляция энергии прямо пропорциональна запаздыванию

на неустановившихся режимах изменения температуры газа на выходе из объема по сравнению с её изменением на входе, происходящему из-за конечной скорости распространения возмущений вдоль потока),

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

В настоящей работе, на основе объединения результатов изложенных в [3,5,6,7,9], приведены обобщенные данные по исследованию влияния газодинамических нестационарных факторов на параметры ГТД на неустановившихся режимах работы ГТД. Исследования выполнены с помощью элементарных ММ однофазного ГТД в квазистационарной постановке и с учетом накопления массы и энергии рабочего тела в объемах проточной части. В [5,6] показано, что эффекты влияния накопления массы и энергии рабочего тела на параметры ГТД увеличиваются с увеличением времени пребывания воздуха и газа в объемах и с увеличением скоростей переходных процессов.

В [7] на основе анализа

- дифференциального уравнения, описывающего накопление массы в объемах проточной части ГТД

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

(полученного в [8] 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),

- дифференциального уравнения, описывающего накопление энергии газа в объемах проточной части ГТД,

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

(полученного путем 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), 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 объемах ГТД на неустановившихся режимах, (где τ – время пребывания газа в объемах).

На основе результатов математического моделирования переходных процессов ГТД с учетом и без учета накопления массы и энергии получены обобщенные критериальные зависимости относительного изменения расхода газа, полного давления и температуры торможения от критериев подобия K_M и K_E [7]. Установлены условные пороговые значения критериев подобия $K_M=0,001$ и $K_E=0,002$, при превышении которых учет накопления массы и энергии оказывает влияние на результаты математического моделирования. Показано, что накопление массы газа в объемах камеры сгорания и реактивного сопла в процессе приемистости одновального ТРД приводит к увеличению запаса газодинамической устойчивости компрессора [9].

Выполнен анализ геометрических характеристик основных и форсажных камер отечественных и иностранных ГТД, их термодинамических параметров, скоростей изменения давлений и температур в камерах сгорания в процессах приемистостей. Показано влияние эффектов накопления массы и энергии в объемах форсажных камер на изменение удельной работы турбин низкого давления ТРДФ и ТРДДФ [9].

Библиографический список

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