

УДК 629.7.036

Б. Р. АБДУЛЛИН, В. П. АЛАТОРЦЕВ, А. А. ВОЛИК, Х. С. ГУМЕРОВ

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ МАЛЫХ ЭФФЕКТОВ В АВИАЦИОННЫХ ГТД

Рассматривается метод решения задачи по оценке влияния небольших конструктивных изменений в проточной части двухвального ТРДДФсм, связанных с заменой реактивного сопла осесимметричной схемы на сопло с управляемым вектором тяги. *Авиационный газотурбинный двигатель; математическое моделирование; реактивное сопло; проточная часть; утечка*

В сложных технических объектах, каковым, несомненно, является авиационный газотурбинный двигатель, интегральные свойства формируются на основе множества частных характеристик его составных частей. В этих условиях оценка эффективности небольших конструктивных или технологических изменений становится труднейшей задачей. Например, сравнение характеристик регулируемого реактивного сопла ТРДДФсм осесимметричной схемы и схемы с управляемым вектором тяги.

Большое число подвижных деталей с большой протяженностью линий контактов в условиях существенной силовой и тепловой окружающей неравномерности делают почти нереальной объективную оценку утечек рабочего тела из газоздушного тракта с помощью аналитических решений либо прямых измерений. В месте сочленения поворотного сопла с концевой частью форсажной камеры температура достигает 2000°С, а давление 5...7 атмосфер [1, 2].

В статье приводится решение поставленной задачи с использованием статистической информации и математической модели рабочего процесса авиационного двигателя.

Для повышения точности решения используются не единичные измерения параметров двигателей с соплами различных схем, а среднестатистические параметры больших выборок на двух режимах по данным предельных испытаний.

В табл. 1 и 2 приведены среднестатистические показатели рабочего процесса двух сравниваемых модификаций на двух основных режимах работы по актам сдачи стендовых испытаний — максимальном (М) и полного

форсирования (Ф). Особенностью первой модификации (Ф) является газодинамический тракт с осесимметричным регулируемым соплом, второй модификации (ФП) — газодинамический тракт с поворотным соплом для изменения вектора тяги.

Таблица 1

Параметры на режиме МАКСИМАЛ

Параметры	Модификация Ф	Модификация ФП
$n_1, \%$	97,97	98,24
$n_2, \%$	99,63	99,67
$R, \text{кгс}$	7678	7673
$C_R, \text{кг/кгс}\cdot\text{ч}$	0,74	0,755
$T^*_r, \text{К}$	1611,9	1631,5
$G_T, \text{кг/ч}$	5674	5793
$G_v, \text{кг/с}$	112,59	112,64
$\pi^*_{т\sigma}$	6,99	7
$T^*_{твг}, \text{К}$	1044	1055
m	0,640	0,658
$\pi^*_{тнд}$	3,510	3,515
$\pi^*_к$	21,90	21,87
$F_{ca1}, \text{см}^2$	302,7	302,7
$D_{pc}, \text{мм}$	591,6	
$D_{pсделип}$	44,8	42
$P^*_к, \text{кПа}$	2218	2215
$P^*_б, \text{кПа}$	354,8	356,1
$P^*_т, \text{кПа}$	298,2	297,5

Версия об увеличившихся утечках газа из сопла и, как следствие, возросшей трудности отладки одинаковой тяги на максимальном режиме подтверждается более напряженными параметрами у модификации ФП по сравнению с Ф. При возросших параметрах модификации ФП тот же выходной импульс соп-

ла, то есть тяга, может быть получена только с меньшим массовым расходом газа. Подтверждением этой гипотезы является меньший диаметр критического сечения сопла у модификации ФП ($D_{\text{рсделИП}} = 42$ вместо 44,8).

Таблица 2

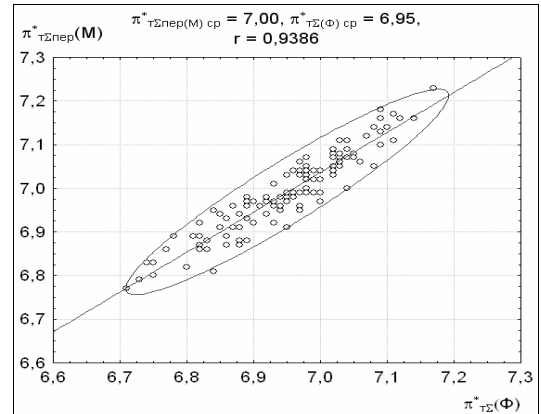
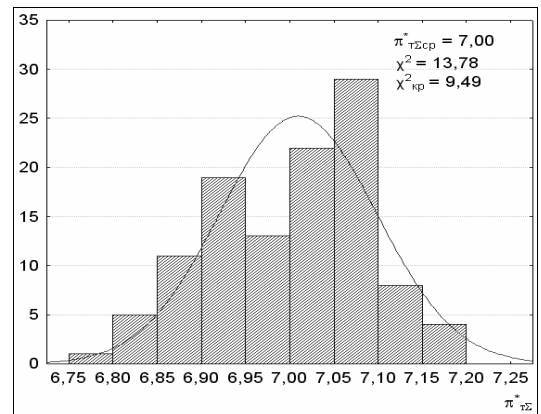
Параметры на режиме ФОРСАЖ

Параметры	Модификация Ф	Модификация ФП
$n_1, \%$	98,10	98,39
$n_2, \%$	99,48	99,75
$R, \text{кгс}$	12486	12322
$C_R, \text{кг/кгс}\cdot\text{ч}$	1,910	1,937
$G_T, \text{кг/ч}$	23880	23840
$T_{\text{ТВГ}}, \text{К}$	1060	1068
$G_B, \text{кг/с}$	112,66	112,71
$\pi_{\text{Т}\Sigma}^*$	6,95	6,92
$T_r^*, \text{К}$	1621	1639,1
m	0,63	0,651
$\pi_{\text{кнд}}^*$	3,53	3,528
$\pi_{\text{к}}^*$	22,02	21,99
$P_{\text{к}}^*, \text{кПа}$	2231	2227
$P_6^*, \text{кПа}$	357,5	357,4
$P_T^*, \text{кПа}$	301,6	302,7

Если в математической модели двигателя в качестве параметров настройки режима (n_1 и $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*$) принять их среднестатистические экспериментальные значения, то разница параметров в проточной части на режимах М и Ф объясняется большей загрузкой ротора высокого давления (дополнительная мощность, равная 100 кВт, вполне соответствует мощности, потребляемой насосом форсажного топлива на режиме полного форсирования). В принципе, режим работы турбокомпрессора при включенной и отключенной форсажной камере определяется одинаковой настройкой регуляторов n_1 и $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*$. Об этом говорит тесная корреляция между $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*(\text{М})$ и $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*(\text{Ф})$, представленная на рис. 1.

Остаточное значений $\delta\pi_{\text{Т}\Sigma}^* = \pm 1\%$ при $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*\text{Ф} = \text{idem}$, вероятнее всего, есть характеристика точности оценки этого параметра на основе измерений давления за компрессором и турбиной двигателя. Некоторое смещение медианы $\pi_{\text{Т}\Sigma\text{М}}^*$ по отношению к медиане $\pi_{\text{Т}\Sigma\text{Ф}}^*$ в сторону увеличения на величину $\Delta\pi_{\text{Т}\Sigma(\text{М}-\text{Ф})}^* = 0,04$ может объясняться посадкой створок сопла на механический упор режима М (рис. 2), то есть сочетанием двух законов поддержания режима: $F_{\text{кр}} = \text{const}$ и $\pi_{\text{Т}\Sigma}^* =$

$= \text{const}$. Вследствие чего распределение отличается от нормального: $\chi^2 > \chi_{\text{кр}}^2$.

Рис. 1. Взаимосвязь настроек регулятора $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*$ на режимах Ф и МРис. 2. Распределение настройки регулятора $\pi_{\text{Т}\Sigma}^*$

Все эти изменения хорошо описываются единой математической моделью двигателя на обоих режимах работы. Такая модель может быть создана на основе статистической информации предъавительских испытаний двух модификаций двигателей.

Согласно приведенным в табл. 1 и 2 данным, имеется следующее различие в основных среднестатистических параметрах рабочего процесса сравниваемых модификаций (табл. 3).

Описанный механизм согласования режимов М и Ф для модификации двигателя ФП отличается некоторой спецификой: из-за большего прикрытия створок сопла посадка на механический упор происходит по-разному на каждом из сравниваемых режимов, отчего режим работы турбокомпрессорной части двигателя на максимальном режиме по отношению к режиму полного форсирования несколько более раскрыт на модификации двигателя ФП в сравнении с модификацией двигателя Ф.

Таблица 3

Различие параметров двух модификаций(двигатель ФП по отношению к двигателю Ф)

Режимы	$\Delta n_1, \%$	$\Delta n_2, \%$	$\Delta R, \text{кгс}$	$\Delta C_R, \text{кг/кгс}\cdot\text{ч}$	$\Delta T_T^*, \text{К}$	$\Delta G_T, \text{кг/ч}$	$\Delta G_B, \text{кг/с}$	$\Delta \pi_{T\Sigma}^*$
Режим М	0,27	0,05	-5	0,015	19,6	118,5	0,05	0,011
Режим Ф	0,27	0,27	-164	0,027	18,2	-39,9	0,05	-0,03
	$\Delta T_{ТВГ}^*, \text{К}$	$\Delta P_K^*, \text{кПа}$	$\Delta P_6^*, \text{кПа}$	$\Delta P_T^*, \text{кПа}$	Δm	$\Delta \pi_{кнд}^*$	$\Delta \pi_K^*$	
Режим М	10,84	-2,78	1,34	-0,723	0,018	0,005	-0,034	
Режим Ф	8,47	-3,64	-0,1	1,105	0,021	-0,002	-0,034	

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать следующие выводы:

- различные режимы работы двух модификаций двигателя могут быть описаны единой математической моделью;
- для описания параметров двигателя модификации ФП достаточно внести в математическую модель двигателя Ф учет утечек газа в механизмах поворота реактивного сопла. Величины этих утечек равны: для режима М – 0,39%, для режима Ф – 1,5%.

Сочетание методов статистического анализа и математического моделирования позволило определить малые изменения параметров на различных режимах, а также изменение характеристик реактивного сопла с изменяемым вектором тяги в условиях, когда эти изменения сопоставимы с точностью измерения параметров на единичном двигателе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зрелов, В. А.** Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы : учеб. пособие / В. А. Зрелов. М. : Машиностроение, 2005. 336 с.
2. **Научно-производственное объединение «Сатурн»** (www.npo-saturn.ru) [Электронный ресурс].

ОБ АВТОРАХ



Абдуллин Булат Ринатович, ассист. каф. авиац. двигателей. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Алаторцев Владимир Петрович, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1964), канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1973). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Волик Андрей Александрович, асп. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Гумеров Хайдар Сагитович, проф. каф. авиационных двигателей. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1988), заслуж. деятель науки и техники РБ. Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.