

9. Громов Н. Н., Овруцкий Е. А. и др. Экономика воздушного транспорта. М., «Транспорт», 1971.

10. Дорюфеев В. М. и др. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок М., «Машиностроение», 1973.

П. А. Бодров

О ВЛИЯНИИ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТВД НА ВЕЛИЧИНУ ПОПРАВочНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ К ФОРМУЛАМ ПРИВЕДЕНИЯ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- N_e — мощность двигателя, л. с.;
 L_e — удельная работа;
 G — расход воздуха, газа, топлива, кг/сек, кг/час;
 n — частота вращения ротора, об/мин;
 T, t — температура воздуха, газа, °К, °С;
 P — давление воздуха, газа, кгс/см²;
 π — степень повышения (понижения) полного давления;
 η — коэффициент полезного действия;
 k — показатель адиабаты;
 c_p — удельная изобарная теплоемкость;
 ξ — коэффициент полноты сгорания;
 V — скорость.

ИНДЕКСЫ

- * — полные параметры потока;
ад — адиабатный;
о — параметры, приведенные к стандартным атмосферным условиям (САУ) по формулам теории подобия;
пр — то же, с поправками на реальный процесс в двигателе;
в — воздух;
г — газ, вход в турбину;
к — компрессор, выход из компрессора;
т — турбина, выход из турбины, топливо;
м — механический;
н — сечение невозмущенного потока перед двигателем;
кс — камера сгорания;
288 — параметры, соответствующие температуре $T_n^* = 288,8^\circ\text{К}$,

Экспериментальные исследования характеристик ТВД показывают, что приведенные к САУ по обычным формулам [1] величины основных параметров двигателя не остаются постоянными на подобных режимах при изменении атмосферных условий.

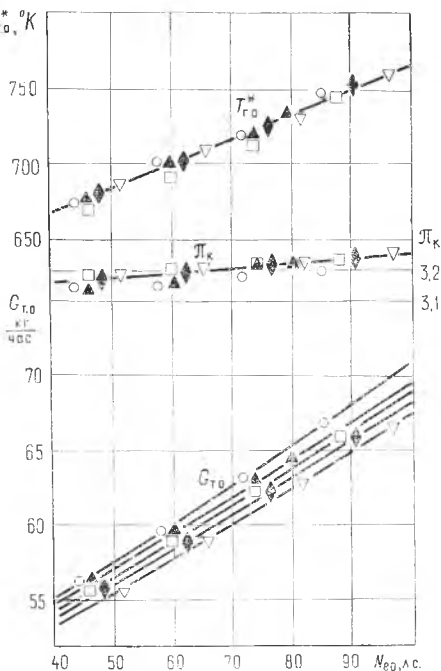
Рис. 1. Экспериментальные нагрузочные характеристики ТВД при $H = 0$;

$V = 0$; $\frac{n}{\sqrt{T_H^*}} = \text{const}$ и различных

значениях t_H^* :

○ — +42 °С; ▲ — +24 °С; □ — +15 °С;

◆ — -12 °С; ▽ — -32 °С;



Например, нагрузочные характеристики низкотемпературного турбовального двигателя с центробежным компрессором ($G_{г.о.} \approx 2 \text{ кг/сек}$; $\pi_{г.к.} = 3$; $T_{г.о.}^* = 950^\circ\text{К}$), полученные на высотно-климатическом стенде в отраслевой научно-исследовательской лаборатории КуАИ при различных температурах воздуха на входе в компрессор (от -30° до $+42^\circ\text{С}$) и при $\frac{n}{\sqrt{T_H^*}} = \text{const}$, при приведении к САУ расслаивались,

как показано на рис. 1.

Термогазодинамический анализ экспериментов показал, что расслоение получается в основном из-за того, что не учитывается изменение теплоемкости рабочего тела в тракте испытанного ТВД при изменении t_H^* . Поэтому необходимо применить уточненные формулы приведения. Это уточнение применительно к ТРД и ТРДД рассматривается в ряде работ [2], [3].

В настоящей статье рассмотрены особенности уточнения формул приведения для ТВД.

Экспериментальным методом определить влияние изменения свойств рабочего тела на характеристики малоразмерного ТВД затруднительно вследствие вероятного изменения (одновременно с c_p) числа Re и геометрических характеристик проточной части двигателя при изменении t_H^* . Поэтому это влияние было определено сопоставлением расчетных нагрузочных характеристик рассматриваемого ТВД при различных значениях t_H^* . Характеристики

рассчитывались по энтальпийно-энтропийному методу с использованием типовых характеристик компрессора и турбины [4].

Величины $\eta_{\text{кад}}$, $\eta_{\text{тад}}$, $\eta_{\text{м}}$, $\xi_{\text{кс}}$ на подобных режимах принимались постоянными. Расчеты показали, что вследствие изменения свойств рабочего тела при изменении $t_{\text{н}}^*$ приведенные значения температур газа и степени изменения давлений в элементах двигателя на подобных режимах практически не меняются. Поэтому в случае ТВД необходимо уточнять формулы приведения к САУ только двух параметров — часового расхода топлива G_{T} и мощности $N_{\text{е}}$.

$$1. \quad \frac{G_{\text{T}288}}{1,0332 \sqrt{288}} = \frac{q_{\text{T}288}}{q_{\text{T}}} \cdot \frac{T_{\text{н}}^*}{288} = \bar{G}_{\text{T}},$$

$$\frac{G_{\text{T}}}{P_{\text{н}}^* \sqrt{T_{\text{н}}^*}}$$

где относительный расход топлива

$$2. \quad \frac{N_{\text{е}288}}{1,0332 \sqrt{288}} = \frac{L_{\text{е}288}}{L_{\text{е}}} \cdot \frac{T_{\text{н}}^*}{288} = \bar{N}_{\text{е}},$$

$$\frac{N_{\text{е}}}{P_{\text{н}}^* \sqrt{T_{\text{н}}^*}}$$

где

$$L_{\text{е}} = \frac{c_{\rho_{\text{T}}}}{A} \bar{G}_{\text{T}} T_{\text{н}}^* \left[1 - \frac{1}{\frac{k_{\text{T}}}{k_{\text{Г}}}} \right] \eta_{\text{тад}} \cdot \eta_{\text{м}} - \frac{c_{\rho_{\text{В}}}}{A} T_{\text{н}}^* \frac{\tau_{\text{к}}^{\frac{k_{\text{В}}}{k_{\text{Г}}}}}{\eta_{\text{кад}}^*},$$

$$\bar{G}_{\text{T}} = \frac{G_{\text{T}}}{G_{\text{н}}} - \text{относительный расход газа.}$$

Из пунктов 1 и 2 видно, что величины \bar{G}_{T} и $\bar{N}_{\text{е}}$ зависят от c_{ρ} . Уточненные формулы приведения часового расхода топлива и мощности принимают вид:

$$G_{\text{T,уп}} = G_{\text{T}} \frac{1,0332}{P_{\text{н}}^*} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{н}}^*}} \cdot \bar{G}_{\text{T}};$$

$$N_{\text{е,уп}} = N_{\text{е}} \frac{1,0332}{P_{\text{н}}^*} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{н}}^*}} \cdot \bar{N}_{\text{е}}.$$

Расчет нагрузочных характеристик был сделан также и для высокотемпературного ТВД типа «Аллисон» Т56-А-18 с осевым компрессором, имеющим более высокий уровень параметров рабочего процесса ($\tau_{\text{к}} = 9,7$; $T_{\text{н}}^* = 1450^{\circ}\text{K}$).

Анализ влияния теплоемкости для двух указанных типов ТВД проводился в трех вариантах. Так, первый вариант расчетов был проведен для случая, когда подобный режим работы ТВД определялся условиями $\frac{n}{\sqrt{T_n^*}} = \text{const}$ и $\frac{G_B \sqrt{T_n^*}}{P_n^*} = \text{const}$ (табл. 1).

Таблица 1

Исследованный ТВД	$t_n^*, \text{ }^\circ\text{C}$	Изменение параметров, %					
		δN_{e_0}	δG_{T_0}	$\delta T_{T_0}^*$	$\delta T_{K_0}^*$	$\delta T_{T_0}^{**}$	$\delta \pi_K$
Низкотемпературный	-30	1	2,5	-0,3	-0,2	0,3	0
	+42	-0,6	-1,6	0,4	0,2	-0,2	0
Высокотемпературный	-30	0,5	3,4	-1	-0,6	0,6	0
	+42	-0,3	-1,8	0,4	0,4	0,2	0

Здесь $\delta G_{T_0} = \frac{G_{T_{\text{зад}}} - G_{T_0}}{G_{T_0}} 100\%$ и т. п., тогда $\bar{G}_T = 1 + \delta G_{T_0}$ и т. п.

Из табл. 1 видно, что обычные формулы приведения для низкотемпературного ТВД при отклонении температуры атмосферного воздуха от САУ дают погрешности, превышающие точность измерения этих параметров: $\delta G_{T_0} = -1,6 \div 2,5\%$; $\delta N_{e_0} = -0,6 \div 1\%$, у высокотемпературного ТВД — соответственно — $1,8 \div 3,4\%$ и $-0,3 \div 0,5\%$.

Второй вариант расчетов нагрузочных характеристик был произведен для случая, когда подобный режим работы ТВД определялся условиями $\frac{n}{\sqrt{T_n^*}} = \text{const}$ и $\frac{T_T}{T_n^*} = \text{const}$ (табл. 2).

Таблица 2

Исследованный ТВД	$t_n^*, \text{ }^\circ\text{C}$	Изменение параметров, %					
		δN_{e_0}	δG_{T_0}	$\delta T_{K_0}^*$	$\delta T_{T_0}^*$	δG_{B_0}	$\delta \pi_K$
Низкотемпературный	-30	3,3	3,1	-0,2	0,6	-0,1	0,05
	+42	-1,9	-2	0,1	-0,5	0,1	-0,06
Высокотемпературный	-30	2,8	4,8	-0,6	1,6	-0,3	0,2
	+42	-1,5	-2,7	0,4	0,8	0,2	-0,1

Из табл. 2 видно, что в этом случае погрешности обычных формул приведения иные и составляют для низкотемпературного ТВД $\delta G_{T_0} = -2 \div 3,1\%$; $\delta N_{e_0} = -1,9 \div 3,3\%$, для высокотемпературного ТВД

соответственно $-2,7 \div 4,8 \%$ и $-1,5 \div 2,8 \%$, т. е., как и в первом случае, значительно превышают точность измерения расхода топлива и мощности.

Третий вариант нагрузочных характеристик был рассчитан для случая, когда подобный режим работы ТВД определялся условиями $\frac{n}{V T_H^*} = \text{const}$; $\frac{N_e}{P_H^* V T_H^*} = \text{const}$ (табл. 3).

Таблица 3

Исследованный ТВД	t_H^* , °C	Изменение параметров, %					
		δG_{T_0}	$\delta T_{T_0}^*$	$\delta T_{T_0}^*$	$\delta T_{T_0}^*$	δG_{B_0}	$\delta \pi_K$
Низкотемпературный	-30	2,1	-0,5	0,2	0	0,07	-0,02
	+42	-1,3	0,4	-0,1	0	-0,07	0,02
Высокотемпературный	-30	3	-1,2	-0,6	0,3	0,1	-0,08
	+42	-1,4	0,7	0,4	-0,1	-0,05	0,04

Для последнего варианта поправочный коэффициент требуется только к формуле расхода топлива, так как принимается $\bar{N}_e = 1$. Величина δG_{T_0} в данном случае получилась существенно иной, чем в табл. 2.

Величины же изменения других параметров ($T_{T_0}^*$, $T_{T_1}^*$, $T_{T_2}^*$, G_{B_0} , π_K) в обоих вариантах ТВД во всех случаях незначительны, и эти параметры можно приводить к САУ, пользуясь обычными формулами подобия.

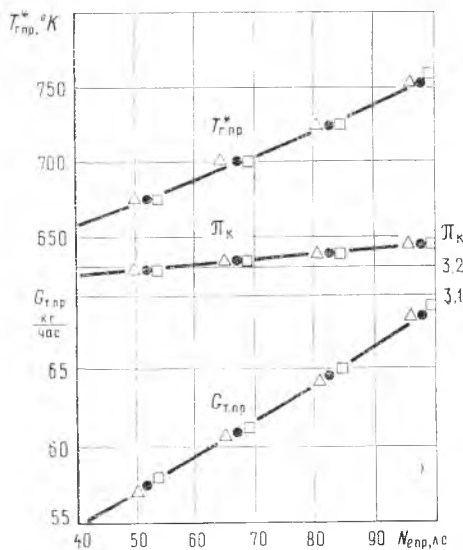


Рис. 2. Экспериментальные нагрузочные характеристики ТВД при $H = 0$;

$V = 0$; $t_H^* = -30^\circ\text{C}$; $n = \text{const}$,

приведенные к САУ с поправочными коэффициентами, соответствующими условиям подобия:

$$\Delta - \frac{N_e}{P_H^* V \sqrt{T_H^*}} = \text{const}; \quad \bullet - \frac{G_B V \sqrt{T_H^*}}{P_H^*} = \text{const}; \quad \square - \frac{T_{T_0}^*}{T_H^*} = \text{const}$$

Анализ величин δG_T и δN_e в рассмотренных вариантах расчета показывает, что поправочные коэффициенты к формулам приведения для одних и тех же параметров ТВД могут существенно отличаться друг от друга по величине в зависимости от выбираемых условий подобия и от уровня параметров рабочего процесса ТВД (T_r^* , π_k).

Однако, если нагрузочные характеристики приводить к САУ по формулам с поправочными коэффициентами, соответствующими любому из рассмотренных условий подобия, то эти характеристики совпадают (рис. 2).

При проведении результатов испытаний к САУ это обстоятельство позволяет использовать ту группу поправочных коэффициентов, учитывающих изменение c_p , которая наиболее целесообразна при обработке экспериментов. Очевидно, что для ТВД предпочтительней поправочные коэффициенты, относящиеся к третьему варианту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стечкин Б. С. и др. Теория реактивных двигателей. М., Оборонгиз, 1958.
2. Бопдарева З. З. и др. Статистический метод адекватности формул приведения параметров ГТД. В сб. «Труды Уфимского авиационного института». Вып. XVII. Уфа, УАИ, 1970.
3. Корж Н. Д., Ронзин В. Д. и Кулагин В. В. Уточнение формул приведения к САУ основных параметров двигателя Д-20П для стендовых условий работы. В сб.: «Некоторые особенности обработки конструкции и параметров авиационных газотурбинных двигателей». Материалы научно-технической конференции. Пермь, ППИ, 1967.
4. Дорофеев В. М. и др. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. М., «Машиностроение», 1973.

Е. Д. Стенькин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИ ДВУХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

p — давление, $\frac{H}{M^2}$;

$\frac{p}{p_0}$ — относительное давление;

$\frac{p}{p_{\Sigma}}$ — отношение полных давлений смешиваемых потоков;

p_{Σ} — относительное полное давление смешанного потока;

T — температура, $^{\circ}K$;