

Министерство высшего и среднего специального
образования Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С.П.Королева

В.В. Кулагин

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ ТРД (ТРД)
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЛОЩАДЯМИ ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ.
ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Учебное пособие

Куйбышев 1980

В данном учебном пособии излагаются особенности совместной работы узлов турбореактивных двигателей различных типов (одноконтурных, двухконтурных) и схем (одновальных, многовальных, без и со смешением потоков) с регулируемыеми площадями характерных сечений и, как следствие, рассматриваются особенности характеристик этих двигателей. Определены закономерности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов и характеристики двухконтурных и одноконтурных двигателей различных схем. Рассматриваются законы и программы регулирования двигателей с несколькими регулирующими факторами.

Темплан 1980, поз. 1010.

Рецензенты - доц. К о р ж Н.Д., доц. Б а к у л е в В.И.



Куйбышевский авиационный институт, 1980

П р е д и с л о в и е

Настоящее учебное пособие является продолжением книг автора "Совместная работа узлов и характеристики ГТД" [15] и "Совместная работа узлов многовальных ТРДД и ТРД. Их характеристики" [16]. В первой книге рассмотрены уравнения совместной работы узлов ГТД в общем виде (гл. 1), закономерности совместной работы узлов одновального турбокомпрессора (гл. 2) и характеристики простейшего ТРД (гл. 3). Во второй книге (гл. 4) рассматриваются многовальные ТРДД и ТРД: совместная работа узлов (§ 1); расчет характеристик (§ 2); особенности обобщенных и высотно-скоростных характеристик (§ 3); влияние параметров рабочего процесса (§ 4) и различных законов регулирования (§ 5) на совместную работу узлов и характеристики; особенности ТРДД со смещением потоков наружного и внутреннего контуров (§ 6). Получены универсальные закономерности, справедливые для двигателей рассматриваемых типов и схем.

В отличие от предыдущих книг, в данном пособии (гл.5) аналогичные вопросы рассматриваются для двигателей с регулируемым площадями характерных сечений.

В § 1 анализируется влияние площади минимального сечения выходного сопла на особенности совместной работы узлов одновального турбокомпрессора, приведены обобщенные и высотно-скоростные характеристики соответствующего ТРД. В § 2 рассматриваются особенности совместной работы узлов и регулирования турбокомпрессора с изменяемыми площадями характерных сечений, а также характеристики соответствующего ТРД с регулируемым сопловым аппаратом и соплом и с регулируемым компрессором. В §3 анализируется влияние

площадей характерных сечений на совместную работу узлов, регулирование и характеристики многовальных ТРДД и ТРД. В § 4 рассматриваются особенности расчета характеристик ТРДД и ТРД с регулируемыми площадями характерных сечений.

В книге анализируются законы, программы и структурные схемы регулирования двигателей с несколькими регулирующими факторами, дана оценка целесообразности применения различных законов регулирования в зависимости от тактико-технических требований, предъявляемых к летательному аппарату, определены закономерности и диапазон изменения площадей характерных сечений из условия удовлетворения различным законам регулирования. Термогазодинамический анализ совместной работы узлов и характеристик двигателей указанных типов и схем сделан на основании уравнений, полученных в [15] и [16].

Методической особенностью данного учебного пособия (как и предыдущих книг) является то, что на основе решения уравнений совместной работы узлов линии совместной работы и обобщенные характеристики определяются вначале, а высотно-скоростные характеристики даются как следствие обобщенных характеристик и принятых законов и программ регулирования. Одноконтурные двигатели рассматриваются как частный случай двухконтурных, а одновальные - как частный случай многовальных.

Автор признателен доценту ППИ Н.Д.Коржу, доценту МАИ В.И.Бакулеву, сотрудникам кафедры "Теория двигателей" и лаборатории № 2 Куйбышевского авиационного института за полезные советы и благодарит инженеров С.К.Бочкарева и С.П.Полукеева за помощь в подготовке пособия к изданию.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- V_n - скорость полета, м/с
 H - высота полета, км
 M - число Маха
 λ - приведенная скорость (отношение скорости потока к критической скорости звука)
 a - скорость звука, м/с
 c - скорость потока, м/с
 u - окружная скорость, м/с
 p - давление, Па
 T - температура, К
 R - тяга двигателя, Н (Дан)
 $R_{уд}$ - удельная тяга двигателя, Н·с/кг (Дан·с/кг)
 $C_{уд}$ - удельный расход топлива, кг/Н·с (кг/Дан·ч)
 π_V^* - степень повышения давления во входном устройстве
 π_K^* - степень повышения давления в компрессоре
 π_Σ^* - суммарная степень повышения давления
 π_T^* - степень понижения давления в турбине
 π_C^* - располагаемая степень расширения газа в сопле
 $\pi_V^* = \frac{p_B^*}{p_H^*}$, $\pi_K^* = \frac{p_K^*}{p_B^*}$, $\pi_\Sigma^* = \frac{p_K^*}{p_H^*}$
 $\pi_T^* = \frac{p_T^*}{p_K^*}$, $\pi_C^* = \frac{p_T^*}{p_H^*}$

n - частота вращения, 1/с

L - удельная работа, Джс/кг (кДжс/кг)

l - отношение удельной работы к энтальпии рабочего тела на входе

$$l_k = \frac{L_k}{c_p T_H^*} = \left(\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_k^*}$$

$$l_r = \frac{L_r}{c_{p,r} T_3^*} = \left(1 - \frac{1}{\pi_r^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \eta_r^*$$

η - коэффициент полезного действия

m - степень двухконтурности

z - отношение полных давлений в наружном и внутреннем контурах

G - массовый расход, кг/с

y_{j-i} - коэффициент, характеризующий изменение массы рабочего тела в сечении i по отношению к массе в сечении j :

$$y_{j-i} = G_i / G_j$$

F - площадь проходного сечения, м²

ρ - плотность, кг/м³

q_{tr} - отношение расхода топлива к расходу воздуха, проходящего через камеру сгорания

R - универсальная газовая постоянная, Дж/кг·К

K, K_r - показатель адиабаты для воздуха, газа

$c_p, c_{p,r}$ - удельная теплоемкость при постоянном давлении для воздуха, газа, Дж/кг·К (кДж/кг·К)

m_{kr} - численный коэффициент в уравнении расхода, (кг·К/Дж)^{0,5}
 $m_{kr} = 0,0405$ (для воздуха), $m_{kr,r} = 0,0397$ (для газа)

σ - коэффициент восстановления давления

φ_c - коэффициент скорости в реактивном сопле

ΔK_y - запас устойчивой работы компрессора

И н д е к с ы

* - параметры заторможенного потока
дв - двигатель
двж - движитель
в - воздух, винт
г - газ
т - топливо, турбина
к - компрессор
с.а - сопловой аппарат
к.с - камера сгорания
ф.к - форсажная камера
с - сопло, секундный
кан - канал наружный
см - смещение
отб - отбор
о - параметры максимального режима в САУ на уровне моря при $M_n = 0$
 — - черта над параметром означает, что рассматривается его относительное значение, т.е. отношение этого параметра к его значению на максимальном режиме в САУ на уровне моря при $M_n = 0$
исх - параметры исходной расчетной точки
п - полетный
м - механический
уд - удельный
ад - адиабатный
теп - тепловой
нд - каскад низкого давления

сд - каскад среднего давления
пд - каскад промежуточного давления
вд - каскад высокого давления
пс - подпорные ступени
 Σ - суммарный
I - внутренний контур ТРДД
 \bar{I} - наружный контур ТРДД
пр - приведенные параметры.

Индексы, стоящие после *пр*, обозначают сечение, по температуре и (или) давлению в котором рассматриваемый параметр приводится к САУ. Если после *пр* не стоит индекс, то рассматриваемый параметр приводится к САУ по T_n^* и (или) P_n^* .

Основные сечения потока

H - невозмущенный поток

β - сечение за входным устройством на входе в компрессор

K - сечение за компрессором

Γ - сечение за камерой сгорания (перед турбиной)

T - сечение на выходе из турбины

Φ - выход из форсажной камеры

C - выходное сечение реактивного сопла

KP - критическое сечение сопла

I - выход из внутреннего контура ТРДЦ (вход в сопло или камеру смешения)

II - выход из наружного контура (канала) ТРДЦ (вход в сопло или камеру смешения)

Сокращения

$САУ$ - стандартные атмосферные условия

$Л.С.Р$ - линия совместной работы

$НА$ - направляющий аппарат

Газодинамические функции

$$q(\lambda) = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \lambda \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}};$$

$$\tau(\lambda) = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2; \quad \pi(\lambda) = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}};$$

$$f(\lambda) = (1 + \lambda^2) \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}; \quad z(\lambda) = \frac{1}{2} \left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right).$$

Глава 5

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРДД (ТРД) С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЛОЩАДЯМИ ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ

Влияние площадей характерных сечений на совместную работу узлов и характеристики ТРДД (ТРД) анализируется при неизменных внешних условиях и, если это специально не оговорено, при постоянной температуре газа перед турбиной. Анализ выполняется с учетом характеристик компрессоров, взятых из [32]. Под площадями подразумеваются, строго говоря, приведенные расходы рабочего тела в рассматриваемых сечениях, которые определяются площадями и относительной плотностью тока в этих сечениях. Например, для газа $G_{г-пр.и} = 2,37 F_c q(\lambda_c)$. Истечение газа из выходных сопел и сопловых аппаратов турбины предполагается критическим или сверхкритическим, т.е. коэффициент скорости в минимальных сечениях $F_{с.кр}$ и $F_{с.а}$ принимается равным единице.

§ 5.1. Особенности совместной работы узлов турбокомпрессора с изменяемым сопротивлением на выходе.

Характеристики одновального ТРД с $F_{с.кр} = \nu a z$

5.1.1. Особенности совместной работы узлов и обобщенные характеристики

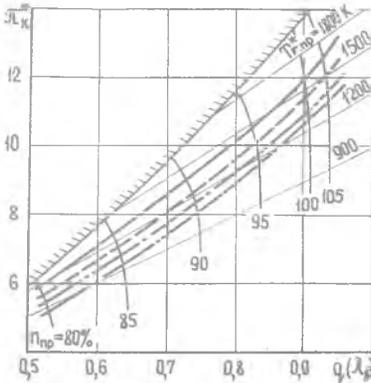
Совместная работа турбины и сопла с регулируемым минимальным сечением $F_{с.кр} = \nu a z$ рассматривалась в разделе 1.2 [15],

где показано (см.рис. I.7), что с увеличением площади сопла увеличивается степень понижения давления газа в турбине π_r^* вследствие уменьшения сопротивления за турбиной.

Из уравнения баланса мощности (I.17) [15] следует, что с увеличением π_r^* при $T_r^* = const$ увеличивается степень повышения давления компрессора π_k^* , так как увеличенному значению работы турбины соответствует увеличенное значение работы компрессора.

Согласно условию неразрывности (I.15) [15], увеличенному π_r^* должно соответствовать увеличенное значение $q(\lambda_B)$, так как расход воздуха через минимальное сечение соплового аппарата турбины изменяется при принятом условии ($T_r^* = const$) пропорционально полному давлению $P_r^* = P_B \pi_k^* \sigma_{kc}$.

В результате каждая рабочая точка на характеристике компрессора смещается по линии $T_{r,пр}^* = const$ вправо-вверх, что обуславливает смещение линии совместной работы и увеличение запасов устойчивой работы (рис.5.I) вследствие уменьшения теплового сопротивления камеры сгорания. Одновременно увеличивается приведенная частота вращения ротора $n_{пр}$.



Р и с. 5. I. Влияние площади сопла $F_{c,кр}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД с $T_{r0}^* = 1600$ К, $\pi_{k0}^* = 12$:

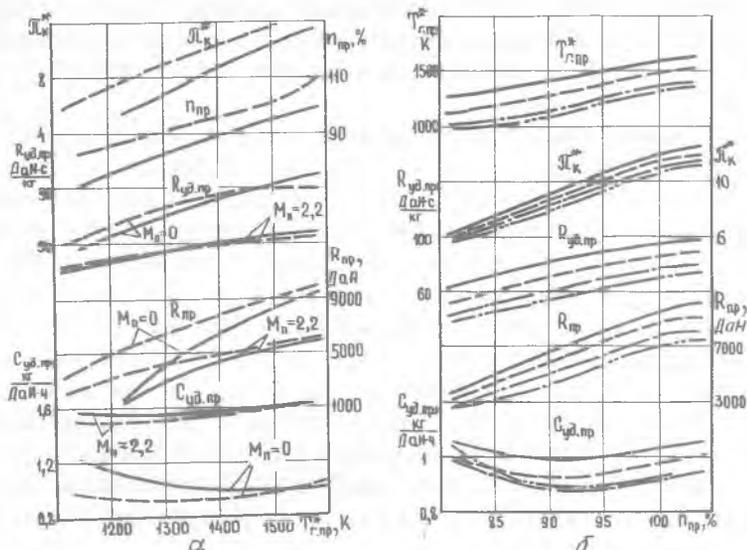
- $F_{c,кр.исх} = 0,23$ м²;
- $\delta F_{c,кр} = +20\%$;
- $\delta F_{c,кр} = +10\%$;
- $\delta F_{c,кр} = +30\%$.

Смещение линии совместной работы вниз и увеличение Δk_y при увеличении $F_{c,кр}$ также легко установить из уравнения (2.1) при $q(\lambda_B) = const$.

Из рис. 5. I следует, кроме того, что в каждой точке характеристики компрессора с нанесенными линиями $T_{r,пр}^* = const$ и $F_{c,кр} = const$ могут быть легко определены не только величины π_k^* , $q(\lambda_B)$, $n_{пр}$, но и $T_{r,пр}^*$, $F_{c,кр}$ и $n_{пр}$.

Температура газа за турбиной с увеличением $F_{c,кр}$ снижается вследствие увеличения работы L_T , степень расширения газа в сопле π_c^* обычно возрастает, так как увеличению π_r^* соответствует более значительное увеличение π_k^* . Удельная тяга изменяется в большинстве

случаев незначительно (рис. 5.2, а) в связи с тем что влияние определяющих ее величин $T_{г}^*$ и π_c^* частично компенсируется.



Р и с.5.2. Обобщенные характеристики ($T_{г}^* = 288 \text{ К}$, $p_{г}^* = 101325 \text{ Па}$) одновального ТРД с $F_{с,кр} = \text{var}$ ($T_{г,о}^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{г,о}^* = 12,6, g_0 = 100 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$): а - зависимость параметров от $T_{г,пр}^*$; б - зависимость параметров от $\eta_{пр}$ при $M_n = 0$ (см. обозначения на рис. 5.1)

Относительный расход топлива q_T при этом уменьшается из-за увеличения температуры воздуха за компрессором. Поэтому и удельный расход топлива с увеличением $F_{с,кр}$ обычно (если КПД узлов изменяются незначительно) уменьшается.

Изменение удельной тяги и удельного расхода топлива в значительной степени определяется изменением КПД компрессора и турбины, а также коэффициента скорости сопла. С увеличением $F_{с,кр}$ КПД компрессора чаще всего снижается (особенно при высоких $\eta_{пр}$), при значительном увеличении $F_{с,кр}$ снижаются также КПД турбины и коэффициент потерь скорости сопла вследствие увеличения скорости газового потока на выходе из турбины. Снижение эффективности работы узлов ведет к уменьшению удельной тяги и увеличению удельного расхода топлива.

Тяга двигателя с увеличением $F_{с.кр}$ увеличивается в зоне низких и средних значений n_{np} благодаря увеличению расхода воздуха. При больших n_{np} тяга уменьшается, так как вследствие снижения λ_k^* величины π_k^* и G_g изменяются незначительно, а $R_{y\theta}$ уменьшается.

Следует отметить, что закономерности влияния площади сопла на тягу и удельный расход топлива связаны с законом регулирования двигателя, точнее, с условиями, при которых рассматривается это влияние.

Физический смысл влияния площади на параметры двигателя, регулируемого по закону $n = const$, сводится к следующему: с увеличением $F_{с.кр}$ мощность турбины становится больше мощности компрессора, что ведет к увеличению частоты вращения ротора; расход топлива через двигатель уменьшается регулятором из условия обеспечения заданного закона регулирования, что ведет к снижению температуры T_r^* , уменьшению теплового сопротивления камеры сгорания и к соответствующему смещению рабочей точки на характеристике компрессора; степень расширения в сопле и температура T_r^* уменьшаются. В этом случае не только за счет увеличения π_r^* , но и вследствие снижения π_k^* и T_r^* соответственно. В результате запасы ΔK_y увеличиваются, удельная и полная тяга уменьшаются. Удельный расход топлива обычно снижается, главным образом, вследствие уменьшения T_r^* (рис. 5.2, б).

Характер и интенсивность влияния площади сопла на тягу и удельный расход топлива не только определяются законом регулирования, но и зависят от параметров рабочего процесса в исходной расчетной точке T_r^* и $\pi_{к0}^*$, положения рабочей точки на характеристике компрессора, которое можно характеризовать величиной $\bar{T}_{r,np}^* = T_{r,np}^* / T_{r,0}^*$, а также от числа M_n . Коэффициенты влияния площади $F_{с.кр}$ на тягу и удельный расход топлива при $T_r^* = const$ возрастают с ростом $T_{r,0}^*$ и уменьшением $\bar{T}_{r,np}^*$ (табл. 5.1).

С увеличением $\pi_{к0}^*$ увеличивается наклон кривых: $\partial R / \partial F_{с.кр} = \xi (\bar{T}_{r,np}^*) \mu \partial C_{y\theta} / \partial F_{с.кр} = \xi (\bar{T}_{r,np}^*)$. С увеличением числа M_n коэффициент влияния площади на тягу изменяется незначительно, если $\bar{T}_{r,np}^* = const$. Если же сравнивать коэффициенты влияния при условии, что физическая температура газа перед турбиной при изменении числа M_n сохраняется постоянной, то увеличение числа M_n приводит к значительному увеличению коэффициентов влияния, главным образом, вследствие смещения рабочей точки на характеристике компрессора в зону

Таблица 5.1

Коэффициент влияния	M_n	0			2,2		
	T_{r0}^* , K	1600	2000	1600	1600	2000	1600
	T_{rnp}^*	12	12	6	12	12	6
	I	0,4	0,6	1	0,7		0,9
$\frac{\partial R}{\partial F_{c.kp}}$	0,9	1,3	2,2	1,1	1,3	1,6	1
	0,8	4,5	5,6	1,6	3,3	2,9	1,4
	I	0	0	0,2	-0,06		-0,04
$\frac{\partial C_{y0}}{\partial F_{c.kp}}$	0,9	-0,4	-0,3	0	-0,1	-0,14	-0,08
	0,8	-1,4	-1,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,11

низких приведенных частот вращения ротора (изменению полетных условий от $H = 0$, $M_n = 0$ в САУ до $H = 11$ км, $M_n = 2,2$ соответствует при $T_r^* = const$ снижение $T_{r.np}^*$ от I до 0,68), см. табл. 5.1.

Для совместной работы узлов и обобщенных характеристик ТРД с $F_{c.kp} = var$ характерной особенностью является то, что положение рабочей точки на характеристике компрессора и на обобщенных характеристиках, а следовательно и приведенные параметры этого двигателя при $M_n = const$, зависят не от одного, как на ТРД с нерегулируемыми сечениями, а от двух факторов, например, от величин n_{np} и $T_{r.np}^*$. Режим двигателя, который в заданных условиях полета однозначно определяет и положение рабочей точки и все его параметры, задается двумя независимыми переменными. Соответственно при выборе закона и программы регулирования из условия обеспечения наивыгоднейших характеристик необходимо выбирать закономерности изменения двух параметров регулирования.

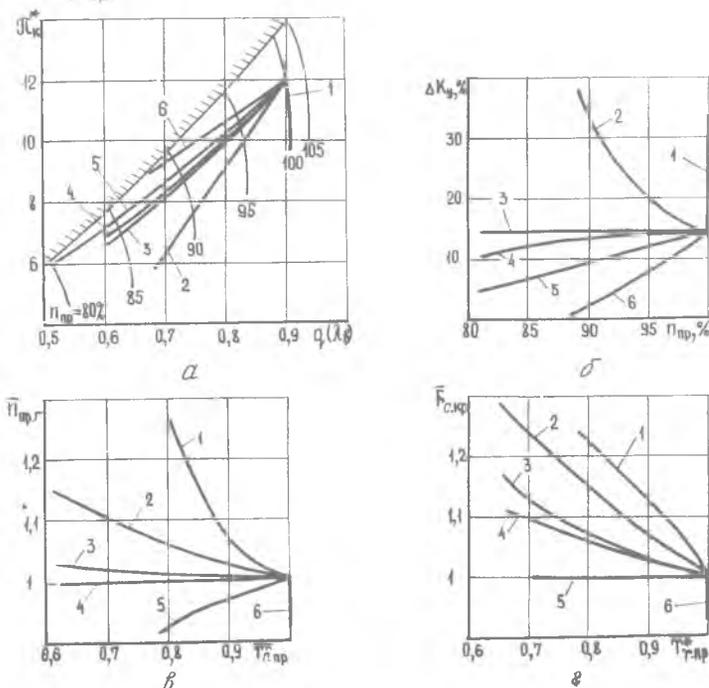
Независимое изменение двух параметров регулирования позволяет обеспечить на двигателе более высокие тяговые и экономические характеристики. ТРД с $F_{c.kp} = var$ является, таким образом, более гибким объектом регулирования. Благодаря этому на таком двигателе можно обеспечить выбранное из каких-либо соображений (например, из условия $\Delta k_y = const$) положение линии совместной работы на характеристике компрессора или выбранную закономерность

Изменения

$$n_{np,r} = \frac{n}{\sqrt{T_r^*}} \sqrt{288} = \frac{n_{np}}{\sqrt{T_{r,np}^*}} \sqrt{288} \quad (5.1)$$

по n_{np} , например, $n_{np,r} = const$, что позволяет на максимальном режиме при $n_{max} = const$ получить $T_{r,max}^* = const$.

Выборное положение линии совместной работы, а следовательно и соответствующая закономерность изменения $n_{np,r}$ (или выбранная закономерность изменения $n_{np,r}$ по $T_{r,np}^*$ и соответствующее расположение линии совместной работы), обеспечиваются, как следует из рис. 5.1, определенной закономерностью изменения площади $F_{с,кр}$ по n_{np} или по какому-либо другому приведенному параметру, например, по $T_{r,np}^*$. На рис. 5.3 показана характеристика нерегулиру-



Р и с. 5.3. Выбранное положение линий совместной работы на характеристике компрессора с $\pi_{к0} = 12$ (а), соответствующие закономерности изменения ΔK_y (б) и $n_{np,r}$ (в) и потребный (для $T_{r0}^* = 1600$ К) диапазон изменения площади $F_{с,кр} = F_{с,кр} / F_{с,кр0}$ по $T_{r,np}^*$ (г); 1 - $n_{np} = const$; 2 - промежуточная; 3 - $\Delta K_y = const$; 4 - $n_{np,r} = const$; 5 - $F_{с,кр} = const$; 6 - $T_{r,np}^* = const$

емого компрессора ($\pi_{к0}^* = 12$) с шестью вариантами наиболее характерного расположения линии совместной работы и соответствующими закономерностями изменения $n_{np,r}$ и $F_{с.кр}$.

В работах [15] и [16] показано, что расположение линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД с нерегулируемыми сечениями, соответствующее изменению запасов устойчивой работы и закономерности протекания $n_{np,r}$ по $T_{с.пр}^*$ определяются исходной степенью повышения давления $\pi_{к0}^*$. Причем на двигателях с $\pi_{к0}^* = 4-6$ в рабочем диапазоне изменения n_{np} величины $n_{np,r}$ и ΔK_y сохраняются постоянными или изменяются незначительно. Следовательно, на этих двигателях условия $F_{с.кр} = const$, $n_{np,r} = const$ и $\Delta K_y = const$ примерно совпадают. На двигателях с низкой степенью повышения давления $\pi_{к0}^* < 4$ при снижении n_{np} запасы ΔK_y и параметр $n_{np,r}$ увеличиваются, а на двигателях с высокой степенью повышения давления $\pi_{к0}^* > 7$ изменяются в противоположную сторону.

Из рис. 5.3 следует, что на двигателе с $\pi_{к0}^* = 12$ для условий $F_{с.кр} = const$, $n_{np,r} = const$ и $\Delta K_y = const$ характерны разные линии совместной работы на характеристике компрессора: наиболее пологая линия и наименьшие запасы при низких n_{np} соответствуют условию $F_{с.кр} = const$; наиболее крутая линия совместной работы - условию $\Delta K_y = const$. Этим линиям соответствуют разные закономерности изменения $F_{с.кр}$ по $T_{с.пр}^*$: чем круче линия совместной работы, тем значительно увеличивается $F_{с.кр}$ при снижении $T_{с.пр}^*$.

Двигатель с реализованной закономерностью $F_{с.кр} = f(T_{с.пр}^*)$ ведет себя как двигатель с одним регулирующим фактором: все остальные параметры в зависимости от $T_{с.пр}^*$ при $M_0 = const$ определяются однозначно.

При выборе закона и программы регулирования двигателя с $F_{с.кр} = var$ целесообразно использовать обобщенные характеристики. В разделе 5.1.3 будет показано, например, как они позволяют выбрать программу регулирования из условия обеспечения $C_{уд.мил}$ на крейсерских режимах пониженной тяги.

5.1.2. Особенности регулирования одновального ТРД с $F_{с.кр} = var$ и его характеристики на максимальном режиме

В § 4.5 [16] показано, что на одновальном ТРД с нерегулируемыми сечениями величина $n_{np,r}$ при изменении $T_{с.пр}^*$ в общем слу-

чае не сохраняется постоянной (см. рис. 4.34). Поэтому с изменением T_H^* температура газа перед турбиной изменяется при регулировании двигателя по закону $n = const$, или изменяется частота вращения при $T_r^* = const$. В обоих случаях двигатель недоиспользуется по температуре T_r^* или по частоте n при их значениях меньше максимальных.

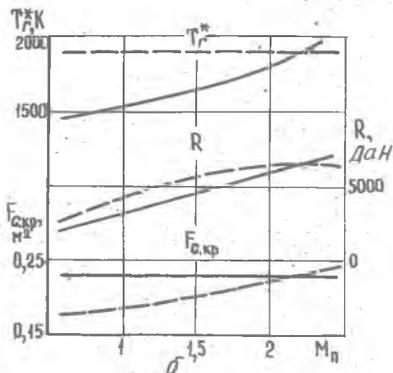
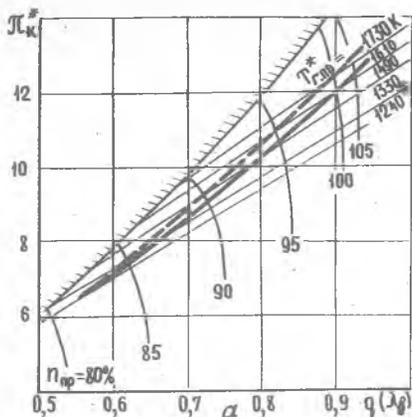
ТРД с $F_{с.кр} = var$ является двигателем с двумя регулируемыми факторами (G_r и $F_{с.кр}$), его режим определяется двумя независимыми параметрами регулирования, например, величинами T_r^* и n .

На максимальном режиме двигателя с $F_{с.кр} = var$ может быть реализован закон, при котором сохраняются постоянными максимальные значения температуры газа перед турбиной и частоты вращения ротора:

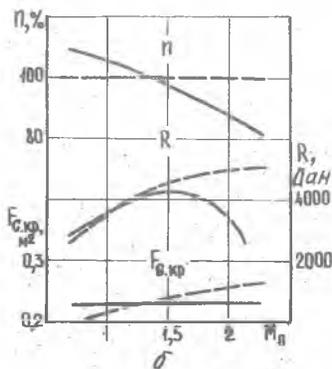
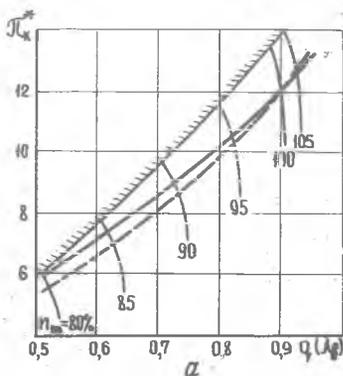
$$T_r^* = const, \quad n = const. \quad (5.2)$$

Он позволяет получить большие значения тяги, чем при $n = const$ или $T_r^* = const$ на ТРД с $F_{с.кр} = const$. В случае $n = const$ (рис. 5.4) ТРД с $\pi_{к_0}^* = 12$ недоиспользуется по температуре T_r^* (а следовательно, и по тяге) на малых скоростях (в том числе на взлете), а в случае $T_r^* = const$ (рис. 5.5) недоиспользуется по n при больших числах $M_{пр}$. Для полного использования двигателя по n и T_r^* необходимо в первом случае уменьшить площадь $F_{с.кр}$ на небольших скоростях, а во втором — увеличить $F_{с.кр}$ при $M_{пр, макс}$ что соответствует смещению линии совместной работы к границе помпажа при высоких $n_{пр}$ в первом случае, в противоположную сторону при низких $n_{пр}$ — во втором. В обоих случаях на двигателе с регулируемым соплом при изменении $n_{пр}$ запасы устойчивой работы изменяются не столь значительно как на рассматриваемом двигателе с $F_{с.кр} = const$.

Линия совместной работы, соответствующая закону регулирования (5.2), может быть нанесена на характеристику компрессора из условия $n_{пр,r} = const$, которое определяется принятым законом. Задаваясь величинами $n_{пр}$, из этого условия по формуле (5.1) определим $T_{р,пр}^*$. Пересечение кривых $n_{пр} = const$ и соответствующих прямых $T_{р,пр}^* = const$ однозначно определяет положение рабочих точек и линию совместной работы на характеристике компрессора (см. рис. 5.4 а).



Р и с. 5.4. Влияние закона регулирования на положение линии совместной работы (а) и скоростные характеристики (б) одновального ТРД ($T_{г.о}^* = 1600$ К, $\pi_{к.о}^* = 12$, $G_{г.о} = 100$ кг/с, $H = 11$ км):
 — $n = const$ ($F_{с.кр} = const$); — — — $T_r^* = const$, $n = const$ ($F_{с.кр} = var$)



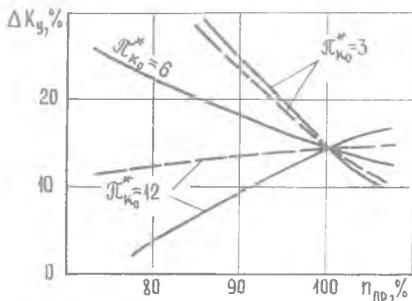
Р и с. 5.5. Влияние закона регулирования на положение линии совместной работы (а) и скоростные характеристики (б) одновального ТРД ($T_{г.о}^* = 1600$ К, $\pi_{к.о}^* = 12$, $G_{г.о} = 100$ кг/с, $H = 11$ км):
 — $T_r^* = const$ ($F_{с.кр} = const$); — — — $T_r^* = const$, $n = const$ ($F_{с.кр} = var$)

Уравнение линии совместной работы можно получить в аналитическом виде, если в уравнении неразрывности (1.15) температуру T^* выразить через $n_{np,r}$ на основании формулы (5.1):

$$\frac{\pi_{\kappa}^*}{q(\lambda_{\beta})} = n_{np,r} B, \quad (5.3)$$

где
$$B = \frac{241 \lambda_{\beta-r} f_{\beta}}{\sigma_{\kappa} \sigma_{np,r} n_{np,r}}.$$

Если на типовые характеристики компрессоров (см. рис. 2.7 [15]) нанести линии совместной работы, полученные из уравнения (5.3), то получим, что с увеличением $\pi_{\kappa_0}^*$ наклон линии уменьшается (если их построить в относительном виде, как это сделано на рис. 2.9), так как при снижении n_{np} относительная плотность тока $q(\lambda_{\beta})$ уменьшается значительно. Поэтому закономерности изменения запасов устойчивости ΔK_y определяются главным образом степенью повышения давления в исходной расчетной точке $\pi_{\kappa_0}^*$. Однако угол наклона линии совместной работы, а следовательно и ΔK_y , изменяются в рассматриваемом случае меньше, чем на двигателе с нерегулируемыми сечениями (рис. 5.6).

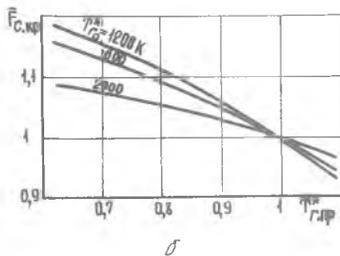
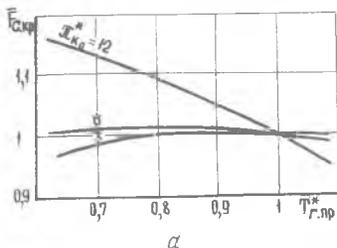


Р и с. 5.6. Закономерности изменения запасов устойчивости компрессоров одновалвных ТРД:

— $F_{с.кр} = const$; --- $n_{np,r} = const$

уменьшается, а с увеличением $\pi_{\kappa_0}^*$ — увеличивается.

Соответственно и закономерности изменения площади минимального сечения сопла $F_{с.кр}$ при $n_{np,r} = const$ определяются величиной $\pi_{\kappa_0}^*$ (рис. 5.7, а). Диапазон изменения площади сопла зависит также от температуры T_r^* (рис. 5.7, б), поскольку ее изменение влияет на степень понижения давления в турбине, которая в свою очередь влияет на площадь $F_{с.кр}$. С увеличением T_r^* потребный диапазон изменения $F_{с.кр}$ (при $\pi_{\kappa_0}^* > 6$) — увеличивается.



Р и с. 5.7. Закономерности изменения площади сопла $F_{c,кр}$ однодвального ТРД при условии $n_{np,r} = const$: а - $T_{c,0}^* = 1600K$; б - $\pi_{к0}^* = 12$

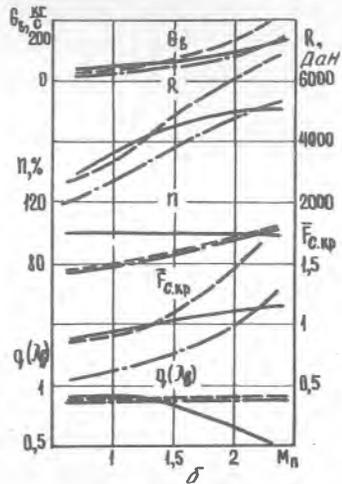
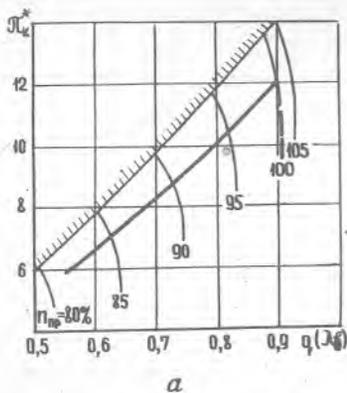
следует заметить, что уравнение (5.3) и соответственно линии совместной работы, показанные на рис. 5.4, а и 5.5, а штрихами, а также штриховые кривые на рис. 5.6 и сплошные на рис. 5.7, строго говоря, соответствуют именно условию $n_{np,r} = const$. Закон регулирования (5.2) является только частным случаем этого условия. В общем случае частота n может изменяться пропорционально $\sqrt{T_{c,0}^*}$, а положение линии совместной работы и перечисленные закономерности остаются неизменными.

При регулировании двигателя с высоким $\pi_{к0}^*$ по закону (5.2) запасы устойчивой работы при значительном уменьшении n_{np} существенно снижаются. Кроме того, с увеличением $M_{п}$ снижаются n_{np} и $\psi(\lambda_{\beta})$, что является фактором, уменьшающим расход воздуха и тягу при высоких скоростях полета.

Перечисленные недостатки устраняются при регулировании двигателя по закону

$$T_{c,0}^* = const, \quad n_{np} = const. \quad (5.4)$$

Если положение исходной расчетной точки на характеристике компрессора, соответствующее взлетным условиям работы, принять для обоих законов регулирования одинаковым при одинаковых расходах воздуха через двигатель, то не будут отличаться также удельные параметры и тяга. С увеличением числа $M_{п}$ при законе (5.4) рабочая точка на характеристике компрессора смещается вправо-вниз, что характеризует более интенсивный прирост расхода воздуха и соответственно тяги (рис. 5.8). Такое изменение параметров и соответствующее увеличение частоты вращения происходит за счет зна-



Р и с. 5.8. Влияние закона регулирования на положение линий совместной работы (а) и скоростные характеристики (б) одно-вальных ТРД ($T_{r0}^* = 1600 \text{ К}$, $H = 11 \text{ км}$):

- $T_r^* = \text{const}$, $n = \text{const}$;
- - - $T_r^* = \text{const}$, $n_{np} = \text{const}$ ($\pi_{kD}^* = 12$);
- · - $T_r^* = \text{const}$, $n_{np} = \text{const}$ ($\pi_{k\text{всх}}^* = 6$)

чительного увеличения площади $F_{c.kp}$, степени понижения давления π_T , и следовательно L_T .

При принятых условиях двигатель, регулируемый по закону (5.4), должен иметь в исходной расчетной точке ту же степень повышения давления π_k^* при пониженной окружной скорости. Следовательно, такой двигатель будет иметь большее число ступеней, большие габариты и массу. Удельная масса двигателя, регулируемого по этому закону, больше на небольших скоростях полета и в условиях взлета.

Если параметры рабочего процесса двигателей, регулируемых по двум сравниваемым законам, а также расходы воздуха через них, принять одинаковыми в высотных условиях при максимальном числе M_n , то в этих условиях будут равны удельные параметры и тяги двигателей (см. штрихпунктирные линии на рис. 5.8). Двигатель, регулируемый по закону (5.4), в высотных условиях при меньшем числе ступеней компрессора будет обеспечивать то же значение π_k^* , так как он имеет более высокий коэффициент скорости λ_B перед

компрессором в этих условиях. Благодаря более высокому значению λ_f этот двигатель будет иметь, кроме того, меньший диаметр при одинаковом расходе воздуха, а следовательно, и меньшую массу. В этом случае двигатель с рассматриваемым законом регулирования при меньшей массе обеспечивает ту же тягу в высотных условиях, но меньшее значение тяги в условиях взлета.

Таким образом, главная особенность двигателя, регулируемого по закону $T_{г}^* = const$, $n_{np} = const$, заключается в том, что с увеличением числа M_n его тяга увеличивается более интенсивно. Это свидетельствует о том, что такой двигатель превосходит по удельной массе двигатель, регулируемый по закону $T_{г}^* = const$, $n = const$, при максимальном числе M_n , но уступает ему при небольших скоростях и на взлете (при низких $T_{г}^*$ он недоиспользуется по окружной скорости, а поэтому оказывается перетяжеленным).

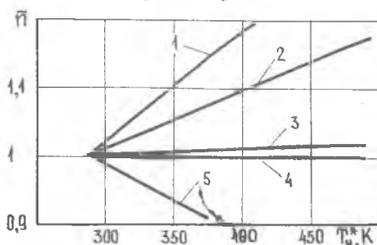
Следовательно, вопросы, связанные с выбором закона регулирования, расчетом высотно-скоростных характеристик и выбором параметров двигателя, взаимосвязаны и должны решаться совместно. Целесообразность применения того или иного закона регулирования определяется тактико-техническими требованиями (ТТТ), предъявляемыми к летательному аппарату.

Если закон регулирования записать в следующем виде:

$$T_{г}^* = const, n = f(T_{г}^*), \quad (5.5)$$

где частота вращения n может принимать значения от постоянной величины до величины, изменяющейся по $T_{г}^*$ согласно формуле $n = const \sqrt{T_{г}^*}$, т.е. по закону $n_{np} = const$ (рис. 5.9), то рассмотренные законы регулирования (5.2) и (5.4) окажутся предельными и частными случаями этого более общего закона регулирования (на рис. 5.9 нанесена кривая 5, соответствующая закону регулирования $T_{г}^* = const$ при $F_{c.kp} = const$).

Функция $n = f(T_{г}^*)$ может быть выбрана из условия обеспечения определенной интенсивности изменения тяги, необходимой для удовлетворения ТТТ на летательный аппарат.



Р и с. 5.9. Зависимость частоты вращения ротора ТРД с $\pi_{к.г.} = I2$ от температуры $T_{г}^*$ при $T_{г}^* = const$ и различных законах регулирования $n = f(T_{г}^*)$ (см. обозначения на рис. 5.3)

Выбранному закону изменения n по T_H^* соответствует линия совместной работы (см. кривые 1, 2, 3, 4 на рис. 5.3, а), расположенная на характеристике компрессора между линиями, отражающими два предельных закона (5.2) и (5.4), и функция $F_{кр} = f(T_H^*)$, которая может быть получена на основании закономерностей, описываемых соответствующими кривыми 1, 2, 3, 4 на рис. 5.3, г.

На двигателях с законами регулирования (5.5) в общем случае не обеспечиваются постоянные запасы устойчивости компрессора. Например, на двигателе с высоким $\pi_{к0}^*$ закону (5.2), согласно которому наиболее полно используются возможности двигателя по n и T_r^* , соответствуют запасы ΔK_y , уменьшающиеся с увеличением M_n . Так как уменьшение этой величины ниже $\Delta K_{y \text{ мин}}$ недопустимо, то применение указанного закона ведет к недоиспользованию двигателя по степени повышения давления в компрессоре при высоких $n_{пр}$, в том числе, на малых скоростях и на взлете. А закону (5.4) соответствуют резко увеличивающиеся запасы устойчивости с повышением числа M_n .

Целесообразно рассмотреть группу законов регулирования, выбранную из условия обеспечения постоянных запасов устойчивости компрессора:

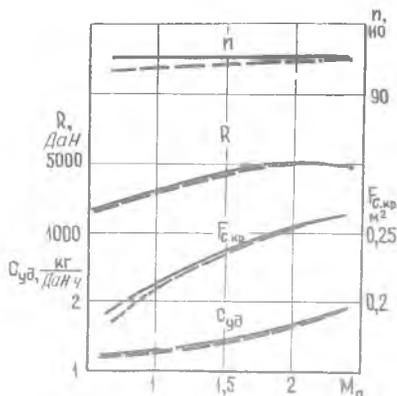
$$\Delta K_y = const, \quad n = f(T_H^*). \quad (5.6)$$

Всем законам регулирования определенного двигателя, удовлетворяющим условию (5.6), соответствует одна линия совместной работы на характеристике компрессора (см. кривую 3 на рис. 5.3, а для двигателя с $\pi_{к0}^* = 12$), а следовательно, величина $F_{кр}$ однозначно определяется приведенной температурой $T_{гпр}^*$ (см. кривую 3 на рис. 5.3, г). Так же однозначно определяются все другие приведенные параметры по $i_{гпр}^*$, в том числе, величина $n_{пр}$ (см. кривую 3 на рис. 5.3, в).

Функция $n = f(T_H^*)$ при законе регулирования (5.6) может выбираться из разных условий. Соответствующее изменение T_r^* по T_H^* определяется зависимостью $n_{пр \cdot r} = f(T_{гпр}^*)$. Например, в рассматриваемом случае ($\pi_{к0}^* = 12$) при снижении $T_{гпр}^*$ приведенная частота $n_{пр \cdot r}$ увеличивается. Следовательно, при $T_{гпр}^* = const$ с увеличением T_H^* увеличивается частота вращения ротора, а при $n = const$ снижается T_r^* . Аналогично кривая 3 на рис. 5.3, г обуславливает закономерности изменения площади сопла $F_{с \cdot кр} = f(T_H^*)$.

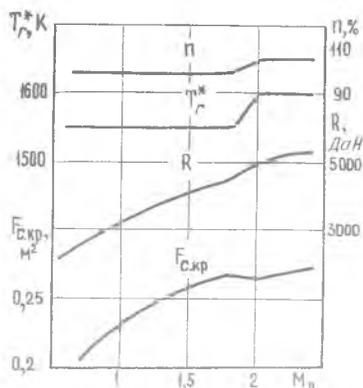
Сравнение характеристик двигателей, регулируемых по законам $\Delta K_y = const$, $T_r^* = const$ (5.6) и $T_r^* = const$, $n = const$ (5.2), проведено на рис. 5.10. Обеспечение условия $\Delta K_y = const$ вместо $n = const$ при одинаковой в обоих случаях температуре T_r^* не оказывает существенного влияния на тягу и удельный расход топлива для принятых параметров рабочего процесса и характеристики компрессора.

Функция $n = f(T_H^*)$ и соответствующая ей $T_r^* = f(T_H^*)$ при $\Delta K_y = const$ могут выбираться из условия обеспечения заданной потребной интенсивности изменения тяги по числу M_n . В этом случае, как и на двигателе с одним регулирующим фактором, для увеличения тяги в каких-либо условиях полета увеличивается частота n и соответственно температура T_r^* , что обуславливает смещение рабочей точки на характеристике компрессора вправо-вверх по одной и той же линии совместной работы. Такой метод увеличения тяги является своего рода форсированием двигателя по температуре T_r^* и частоте вращения ротора в определенных условиях полета, например, при трансзвуковой скорости полета или при максимальном числе M_n (рис. 5.11). Закономерность изменения $F_{с.кр} = f(T_H^*)$



Р и с. 5.10. Сравнение скоростных характеристик одновального ТРД ($T_{r0}^* = 1600$ К, $\pi_{к0} = 12$, $G_{g0} = 100$ кг/с, $H = 11$ км), регулируемого по законам:

$T_r^* = const$; $n = const$; (—)
 $\Delta K_y = const$, $T_r^* = const$ (---)



Р и с. 5.11. Скоростные характеристики одновального ТРД с $F_{с.кр} = var$, регулируемого по закону $\Delta K_y = const$, $n = f(T_H^*)$, выбранному из условия обеспечения заданного изменения тяги по числу M_n ($T_{r0}^* = 1600$ К, $\pi_{к0} = 12$, $G_{g0} = 100$ кг/с, $H = 11$ км)

определяется принятым положением линии совместной работы для двигателя с заданным значением $\pi_{\text{с.к.р}}^*$ и функцией $n = f(T_H^*)$.

Рассмотренный закон регулирования, если его записать в более общем виде:

$$\Delta K_y = f(T_H^*), \quad n = f(T_H^*), \quad (5.7)$$

для одновального ТРД с $F_{\text{с.к.р}} = \text{const}$ является одним из наиболее целесообразных, так как позволяет получить требуемую тягу по числу M_n при расположении линии совместной работы на характеристике компрессора в оптимальной зоне.

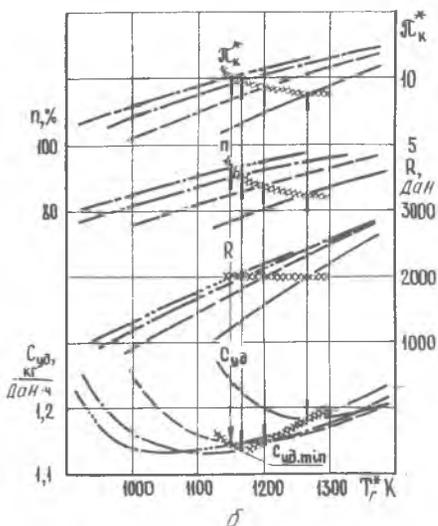
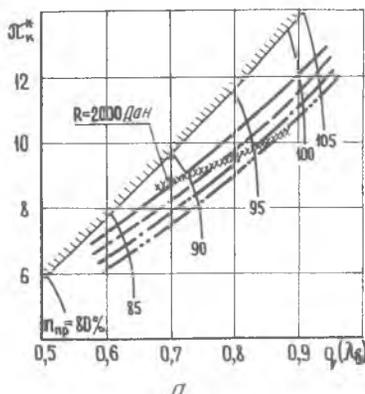
Линия совместной работы на характеристике турбины по существу также не выходит из оптимальной зоны, так как в этом случае на максимальном режиме не требуется широкий диапазон изменения площади сопла.

5.1.3. Особенности регулирования и характеристики одновального ТРД с $F_{\text{с.к.р}} = \text{const}$ на режимах пониженной тяги

На двигателе с $F_{\text{с.к.р}} = \text{const}$ пониженная тяга может быть получена только путем уменьшения расхода топлива, при этом одновременно снижаются T_r^* и n , а рабочая точка смещается по линии совместной работы влево-вниз.

На двигателе с $F_{\text{с.к.р}} = \text{const}$ пониженную тягу можно получить разными способами (при различных программах регулирования): например, путем снижения температуры T_r^* при $n = \text{const}$, или, наоборот, путем снижения n при $T_r^* = \text{const}$. Снижение температуры осуществляется за счет увеличения площади сопла при одновременном уменьшении расхода топлива, снижение n — за счет уменьшения площади сопла при одновременном уменьшении расхода топлива. Эти два способа снижения тяги — предельно крайние случаи: первый способ характеризуется смещением рабочей точки на характеристике компрессора вниз по линии $n_{\text{нр}} = \text{const}$, что ведет к увеличению запасов устойчивости, второй — смещением влево-вниз по линии $T_{\text{нр}}^* = \text{const}$, что обуславливает снижение запасов ΔK_y .

Таким образом двигатель с $F_{\text{с.к.р}} = \text{const}$ имеет более широкие возможности получения пониженной тяги, что позволяет выбрать программу регулирования на этих режимах из условия получения минимального удельного расхода топлива.



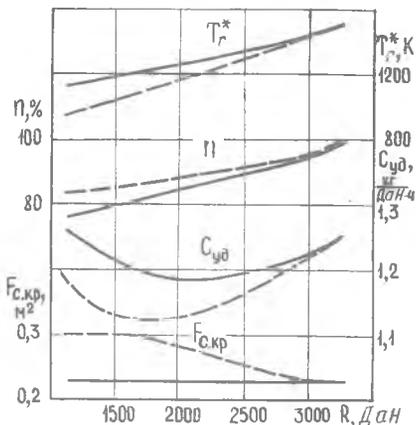
Р и с. 5.12. К выбору оптимальной программы регулирования одно-
вального ТРД с $F_{с.кр} = var$ из условия получения $C_{уд, мин}$
на крейсерских режимах пониженной тяги ($T_{r0}^* = 1600 K$, $\Sigma C_k^* = 12$,
 $C_{в0} = 100$ кг/с, $H=11$ км, $M_{п} = 1$): а - характеристики компрес-
сора с линиями совместной работы; б - дроссельные характери-
стики в условиях $H=11$ км, $M_{п} = 1$ (см. обозначения на рис. 5.1)

Из анализа рис. 5.12, который построен на основании обобщен-
ных характеристик, следует, что при заданной тяге пониженного ре-
жима минимальный удельный расход топлива получается при определен-
ном сочетании параметров T_r^* и n , которое обеспечивается за
счет изменения площади $F_{с.кр}$ и расхода топлива.

Оптимальные сочетания T_r^* и n , найденные из условия
обеспечения минимального удельного расхода топлива на различных
режимах, и соответствующие значения площади сопла показаны на
рис. 5.13. Регулирование сопла позволяет в данном случае снизить
удельный расход топлива на крейсерских режимах на $\approx 6\%$. Потреб-
ное изменение площади сопла достигает при этом $\approx 25\%$.

Полученную таким образом оптимальную программу регулирования
обычно перестраивают как зависимость частоты n и температуры
 T_r^* (или площади $F_{с.кр}$) от угла установки рычага управления.

Оптимальные сочетания T_r^* и n , обеспечивающие $C_{уд, мин}$,
оказываются в общем случае разными для различных условий полета.



Р и с. 5.13. Сравнение дроссельных характеристик одновального ТРД ($T_{r0}^* = 1600 \text{ K}$, $\pi_{\lambda 0}^* = 12$, $G_{e0} = 100 \text{ кг/с}$, $N = 11 \text{ км}$, $M_{r0} = 1$) при оптимальной программе регулирования (— — —) и $F_{с.кр.} = \text{const}$ (—)

Программа регулирования выбирается, как правило, для условий длительного полета. Чтобы не усложнять систему регулирования, эта же программа обычно применяется также в других условиях, аналогично закон регулирования, выбранный для максимального режима, применяется на всех других режимах. Поэтому величины T_{r0}^* и π на всех основных режимах в любых условиях эксплуатации определяются по формулам

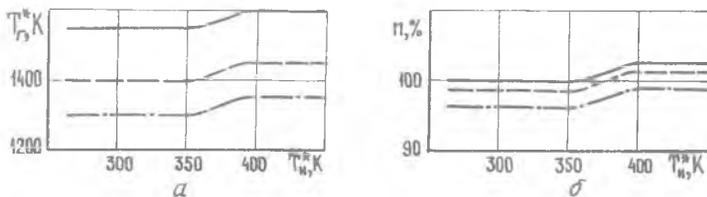
$$T_{r0}^* = \bar{T}_{\infty} \bar{T}_{r0}^* T_{r0}^* ; \quad (5.8)$$

$$\pi = \bar{\pi}_{\infty} \bar{\pi}_{T_{r0}^*} \pi_0 ; \quad (5.9)$$

где $\bar{T}_{\infty} = \frac{T_{r0}^*}{T_{r0}^*}$ и $\bar{\pi}_{\infty} = \frac{\pi}{\pi_0}$ —

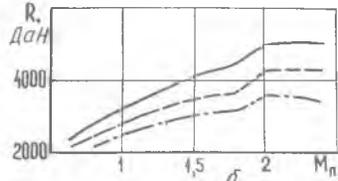
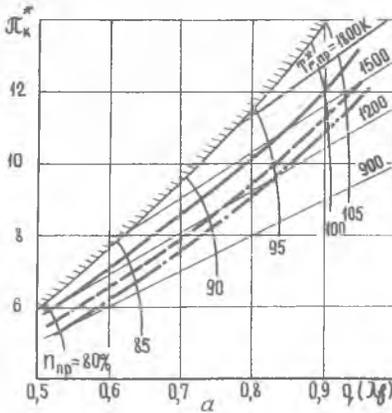
относительное изменение температуры газа перед турбиной и частоты вращения ротора по углу установки рычага управления, заданное программой регулирования; \bar{T}_{r0}^* и $\bar{\pi}_{T_{r0}^*}$ — изменение тех же величин по полной температуре на входе в двигатель, заданное законом регулирования.

Соотношения (5.8) и (5.9) определяют величины T_{r0}^* и π в различных условиях эксплуатации на различных режимах (рис. 5.14). На рис. 5.15 показаны соответствующие им линии совместной работы



Р и с. 5.14. Величины T_{r0}^* (а) и π (б), определяемые законом и программой регулирования, для максимального (—) номинального (— — —) и крейсерского (— · — · —) режимов

на характеристике компрессора и протекание тяги по числу M_{Π} .



Р и с. 5.15. Расположение линий совместной работы на характеристике компрессора (а) и зависимость тяги от числа M_{Π} (б) на трех основных режимах для закона и программы регулирования, показанных на рис.5.14 (обозначения те же, что на рис. 5.14)

5.1.4. Структурные схемы регулирования ТРД с $F_{c.kp} = va z$

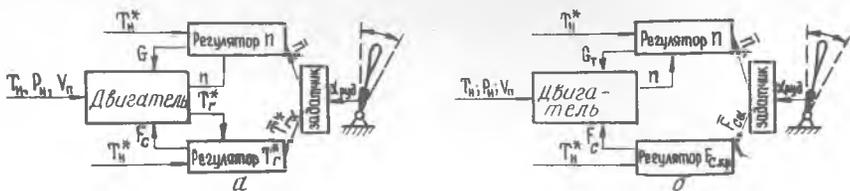
Режим ТРД с $F_{c.kp} = va z$ регулируется путем изменения двух регулирующих факторов (G_T и T_{T^*}). В системе автоматики должно быть два регулятора, один из которых регулирует, например, частоту n путем изменения расхода G_T , другой — температуру T_{T^*} путем изменения площади сопла $F_{c.kp}$.

Воздействие регулирующих факторов на параметры регулирования можно представить в виде

$$G_T \rightarrow n, \quad F_{c.kp} \rightarrow T_{T^*}.$$

Взаимодействие регуляторов и двигателя изображено на структурной схеме (рис. 5.16,а). Регулирование осуществляется воздействием двигателя на регулятор и регулятора на двигатель. Такое регулирование называют замкнутым [36].

В указанной структурной схеме регулирования вместо температуры T_{T^*} , которую трудно измерить, в качестве параметра регулирования может быть принят другой параметр, например, степень понижения давления в турбине π_{T^*} : $G_T \rightarrow n$; $F_{c.kp} \rightarrow \pi_{T^*}$.



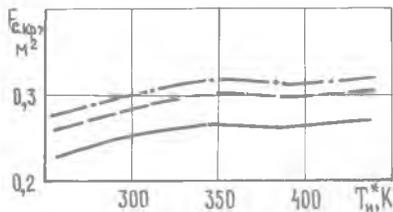
Р и с. 5.16. Структурные схемы регулирования ТРД с $F_{с.кр} = var$: а - замкнутое регулирование n и T_r^* ; б - незамкнутое регулирование площади $F_{с.кр}$

В этом случае процесс регулирования обеспечивается совместной работой регулятора частоты вращения и π_r^* - регулятора.

Распределение регулирующих факторов по параметрам регулирования обычно производится из условия удовлетворительной динамики процессов регулирования. Совместная работа двух замкнутых регуляторов зачастую не обеспечивает требуемой динамики регулирования. Поэтому во многих случаях применяется незамкнутое регулирование сопла, которое выбирают из условия получения заданного закона изменения температуры T_r^* (рис.5.16,б). Тем самым обеспечивается косвенное регулирование температуры.

Поскольку при заданных $T_r^* = f(T_H^*)$ и $n = f(T_H^*)$ однозначно определяется положение рабочих точек на характеристике компрессора и величина $F_{с.кр}$, то и закон регулирования площади сопла задается в зависимости от полной температуры на входе в двигатель (рис. 5.17).

Аналогично при заданной программе изменения параметров регулирования по углу установки рычага управления $T_r^* = f(\alpha_{руд})$ и $n = f(\alpha_{руд})$ однозначно определяется линия совместной работы в данных условиях, а следовательно, и программа регулирования сопла



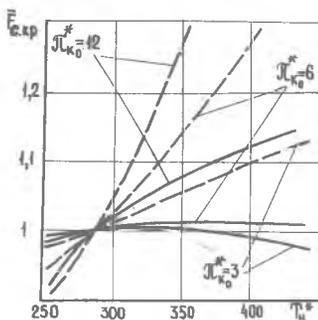
$$F_{с.кр} = f(\alpha_{руд}).$$

Р и с. 5.17. Потребное значение площади сопла $F_{с.кр}$ из условия обеспечения величин T_r^* и n , показанных на рис.5.14 (см.обозначения на рис. 5.14)

Потребный диапазон изменения площади сопла по T_H^* и по $\alpha_{руд}$ может быть получен на основании обобщенных зависимостей, приведенных на рис. 5.3,г и 5.7. Он зависит от закона(программы) регулирования и параметров рабочего процесса

в исходной точке T_{r0}^* и $\pi_{\kappa_0}^*$. Зависимость $F_{c.kp} = f(T_H^*)$ для законов регулирования (5.2) и (5.4) показана на рис. 5.18.

§ 5.2. Особенности совместной работы узлов турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратом, соплом и компрессором и характеристики соответствующего одновального ТРД



Р и с. 5.18. Потребный диапазон изменения площади сопла $F_{c.kp}$ по температуре T_H^* при $\pi_{\kappa_0}^* = var$, $T_{r0}^* = 1600$ К для законов регулирования:
 — $T_r^* = const$, $n = const$;
 - - $T_r^* = const$, $n_{np} = const$

В § 5.1 показано, что одновальный ТРД с $F_{c.kp} = var$ обеспечивает устойчивую работу на основных режимах в широком диапазоне летных условий, более высокое значение $R_{макс}$ на максимальном режиме и более низкое значение $уд_{д.мин}$ на крейсерских режимах пониженной тяги (по сравнению с двигателем с нерегулируемыми сечениями).

Из предыдущего параграфа, однако, понятно что возможности такого двигателя ограничены. Например, при любых программах регулирования с понижением тяги одновременно снижается степень повышения давления компрессора, что не позволяет получить минимально возможный удельный расход топлива на крейсерском режиме длительного полета. Кроме того, не полностью используются возможности двигателя на максимальном режиме: так, при законе регулирования $T_r^* = const$, $n = const$ он, строго говоря, недоиспользуется по π_{κ}^* , а при $T_c^* = const$, $\Delta Ky = const$ - по частоте вращения n .

Для полного использования возможностей одновального ТРД с высоким $\pi_{\kappa_0}^*$ двигатель должен иметь три регулирующих фактора. Таким двигателем является, например, ТРД с $F_{c.a} = var$, $F_{c.kp} = var$. Прежде чем перейти к его рассмотрению проанализируем влияние площади соплового аппарата при неизменных внешних условиях на совместную работу узлов и обобщенные характеристики. Как и в § 5.1, влияние площади на параметры двигателя рассматривается преимущественно для двигателя с высоким $\pi_{\kappa_0}^*$.

5.2.1. Особенности совместной работы узлов и обобщенные характеристики турбокомпрессора (ТРД)

$$\underline{c F_{ca} = \nu a z}$$

С увеличением площади соплового аппарата степень понижения давления в турбине уменьшается [15]. Это ведет к соответствующему снижению π_K^* при $T_{r0}^* = const$ по уравнению баланса мощности (I.17).

Снижение π_K^* и увеличение $G_{np,r}$ оказывает противоположное влияние на величину $q(\lambda_B)$, см. уравнение (I.14), [15]. В общем случае это может привести к различному изменению $q(\lambda_B)$ и, соответственно, положения линии совместной работы на характеристике компрессора [13]. При обычных значениях π_{K0}^* и T_{r0}^* с увеличением площади F_{ca} относительная плотность тока $q(\lambda_B)$, а следовательно и приведенная частота вращения n_{np} , уменьшаются, а линия совместной работы сдвигается влево-вниз (рис. 5.19). Этот же результат можно получить и из уравнения для линии совместной работы (2.2), см [15], поскольку константа в этом уравнении для рассматриваемого случая снижается.

Следует заметить, что с изменением площади F_{ca} линии $T_{rnp}^* = const$ на характеристике компрессора смещаются (см. рис. 5.19), поскольку в уравнении (I.14) изменяется величина $G_{np,r}$, чего не происходит при регулировании $F_{c,kr}$. С увеличением F_{ca} линии $T_{rnp}^* = const$ смещаются вниз. Поэтому увеличение запасов устойчивой работы при $n_{np} = const$ за счет увеличения F_{ca} сопровождается не снижением, как при увеличении $F_{c,kr}$, а наоборот, увеличением температуры газа перед турбиной.

Удельные параметры двигателя с увеличением F_{ca} при $T_r^* = const$ ухудшаются вследствие снижения π_K^* , а тяга уменьшается (рис. 5.20).

Регулирование площади F_{ca} осуществляется, как правило, регулированием угла установки лопаток соплового аппарата. Значительное изменение угла установки ведет к существенному снижению КПД турбины [32] и соответственно к более значительному ухудшению параметров двигателя.

Таким образом, увеличение площадей F_{ca} и $F_{c,kr}$ приводит к одинаковому изменению (увеличению) запасов устойчивой работы компрессора. Влияние площади F_{ca} на остальные параметры

двигателя, в том числе на удельные параметры и тягу, в большинстве случаев противоположно влиянию $F_{c.kp}$. Объясняется это их противоположным влиянием на величину $\pi_{т}^*$.

Интенсивность влияния площадей $F_{c.a}$ и $F_{c.kp}$ на тягу и удельный расход топлива зависит от одинаковых факторов (закона регулирования, $T_{r.o}^*$, $\pi_{к.o}^*$, $T_{a.l.p}^*$ и $M_{л}$). При $T_r^* = const$ коэффициент влияния $F_{c.a}$ на тягу возрастает с увеличением $T_{r.o}^*$ и уменьшением $T_{c.n.p}^*$ (особенно при $M_{л} = 0$), табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Коэффициент влияния	$M_{л}$	0			2,2		
		$T_{r.o}^*, K$	1600	2000	1600	1600	2000
	$T_{c.n.p}^* \backslash \pi_{к.o}^*$	12	12	6	12	12	6
$\frac{\partial R}{\partial F_{c.a}}$	1	-1,7	-2,5	-1,7	-1,3	-2	-1,3
	0,9	-2	-3,4	-2	-1,4	-3	-1,4
	0,8	-2,5	-4,4	-2,5	-1,5		-1,5
$\frac{\partial C_{y\partial}}{\partial F_{c.a}}$	1	0,6	0,8	0,8	0,15	0,18	0,18
	0,9	0,9	1,3	1,2	0,18	0,22	0,21
	0,8	1	1,4	1,5	0,19		0,22

В целом коэффициенты влияния $\frac{\partial R}{\partial F_{c.a}}$ и $\frac{\partial C_{y\partial}}{\partial F_{c.a}}$ незначительно зависят от параметров цикла (особенно от $\pi_{к.o}^*$) (по сравнению с зависимостью от этих параметров аналогичных коэффициентов влияния площади сопла (сравни таблицы 5.2 и 5.1)).

При $M_{л} = 2,2$ изменение площади $F_{c.a}$, как $F_{c.kp}$, оказывает небольшое влияние на удельный расход топлива, по сравнению с влиянием этих площадей при $M_{л} = 0$.

Параметры ТРД с $F_{c.a} = var$, как и двигателя с регулируемой площадью сопла, при неизменных внешних условиях зависит от двух факторов. Поэтому изложенные в разделе 5.1.4 особенности регулирования ТРД с $F_{c.kp} = var$ относятся и к рассматриваемому двигателю.

Использование площади $F_{c.a}$ как регулирующего фактора вместо площади $F_{c.kp}$ в большинстве случаев неприемлемо. Например, для увеличения тяги максимального режима при $T_r^* = const$ площадь $F_{c.a}$ необходимо уменьшать, что при максимальном числе $M_{л}$ на

двигателе с высоким $\pi_{\kappa D}^*$ - ведет к недопустимому снижению запасов устойчивости, которые в этих условиях минимальны. По этой же причине во многих случаях невозможно регулирование F_{Ca} из условия обеспечения $C_{yD min}$ на режимах пониженной тяги. Если учесть также, что регулируемый сопловой аппарат сложнее регулируемого сопла, то становится очевидным, что создание одновального ТРД с $F_{Ca} = va\alpha$, $F_{C\kappa P} = const$ нецелесообразно. Поэтому особенности характеристик и регулирования такого двигателя подробно здесь не рассматриваются.

Эти два регулирующих фактора не исключают, как будет показано, а дополняют друг друга.

5.2.2. Особенности совместной работы узлов, регулирования и характеристик турбокомпрессора (ТРД)

$$\underline{c F_{Ca} = va\alpha, F_{C\kappa P} = va\alpha}$$

Наиболее характерной особенностью этого двигателя является то, что положение рабочей точки на характеристике компрессора в любых полетных условиях может быть выбрано произвольно и, кроме того, в каждой рабочей точке может быть произвольно (из каких-либо соображений) выбрана температура T_r^* . Приведенные параметры такого двигателя при заданном числе M_D зависят от трех факторов, обобщенные характеристики могут быть представлены, например, в виде нескольких графиков, каждый из которых построен для определенного значения площади F_{Ca} при $F_{C\kappa P} = va\alpha$ (см.рис.5.2). Соответственно режим этого двигателя определяется тремя параметрами и выбирается путем их независимого назначения.

При выборе законов и программ регулирования, а также для анализа высотно-скоростных и дроссельных характеристик ТРД с тремя регулируемыми факторами, нецелесообразно строить обобщенные характеристики ввиду их трудоемкости. Проще задаться законом и программой регулирования и непосредственно рассчитать и проанализировать характеристики.

Для максимального режима большой интерес представляет закон регулирования

$$T_r^* = const, n = const, \Delta \kappa_y = const. \quad (5.10)$$

Он позволяет реализовать более высокие значения π_{κ}^* при не-

больших скоростях полета и на взлете (для двигателя с высоким π_{K_0}), что ведет к некоторому (обычно в пределах одного-двух процентов) снижению удельного расхода топлива в этих условиях по сравнению с $C_{уд}$ на ТРД с $F_{с.кр} = \text{var}$, регулируемом по закону (5.2). Применение закона (5.10) позволяет наиболее полно использовать возможности двигателя во всех условиях эксплуатации. Потребное изменение площади $F_{с.а}$ при этом невелико.

Согласно принятому закону регулирования (5.10), задается определенное положение линии совместной работы и величина $n_{пр.г}$. Эти параметры должны обеспечиваться соответствующим изменением площадей $F_{с.а}$ и $F_{с.кр}$ в зависимости от $T_{г.пр}^*$. И наоборот, если функции $F_{с.а} = f(T_{г.пр}^*)$ и $F_{с.кр} = f(T_{г.пр}^*)$ заданы, то ТРД ведет себя как двигатель с одним регулирующим фактором, т.е. положение рабочей точки на характеристике компрессора и все остальные приведенные параметры при $M_0 = \text{const}$, в том числе $n_{пр.г}$, определяются для него величиной $T_{г.пр}^*$.

Изменение площадей $F_{с.а}$ и $F_{с.кр}$, удовлетворяющее закону (5.10), можно получить следующим образом: 1) заданы несколькими рабочими точками на линии совместной работы, находят в этих точках величины $n_{пр.г}$, π_K^* , $q(\lambda_0)$, T_K^* и определяют из условия заданного значения $n_{пр.г}$ приведенную температуру $T_{г.пр}^* = \left[\frac{n_{пр.г}}{n_{пр.г}^*} \right]^2 288$; 2) по уравнению неразрывности (I.14), см. [15], рассчитывается величина $G_{пр.г}$, а, следовательно, и площадь $F_{с.а}$; 3) на основании уравнения мощности (I.17) определяется степень понижения давления π_n^* ; 4) из уравнения неразрывности (I.7) определяется приведенный расход $G_{пр.г}$ и площадь $F_{с.кр}$.

Аналогично могут быть рассчитаны зависимости $F_{с.а} = f(T_{г.пр}^*)$ и $F_{с.кр} = f(T_{г.пр}^*)$ для любого принятого положения линии совместной работы и любой закономерности изменения $n_{пр.г}$. Эти зависимости можно легко перестроить по полной температуре на входе в двигатель T_n^* , если дополнительно задаться законом изменения частоты n или температуры T_r^* по T_n^* и воспользоваться формулой приведения для n (или T_r^*).

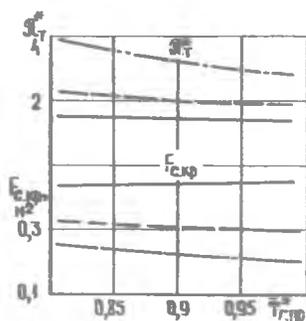
Если потребная тяга более интенсивно, чем это обеспечивается при законе регулирования (5.10), увеличивается по числу M_0 , то, как и на ТРД с двумя регулирующими факторами, целесообразно принимать закон, при котором приведенная частота вращения ротора сохраняется неизменной. Для ТРД с тремя регулирующими факторами в предельном случае может быть реализован закон

$$T_r^* = \text{const}, n_{np} = \text{const}, \pi_k^* = \text{const}.$$

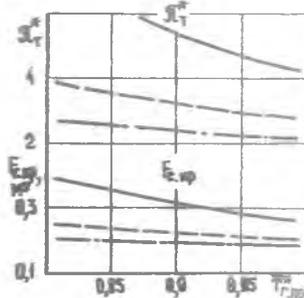
(5.11)

В этом случае при постоянной температуре газа перед турбиной сохраняется также неизменным положение рабочей точки на характеристике компрессора.

При фиксированном положении рабочей точки на характеристике компрессора и снижении температуры $T_{г.пр}^*$ требуемое значение площади F_{ca} , согласно условию неразрывности (I.14), уменьшается пропорционально $\sqrt{T_{г.пр}^*}$. Степень понижения давления в турбине увеличивается, согласно уравнению (I.17). Как показывают расчеты по уравнению (I.7), одновременно увеличивается и площадь сопла $F_{с.кр}$: с уменьшением $\pi_{к0}^*$ (рис. 5.21) и увеличением $T_{г0}^*$ (рис. 5.22) требуемый диапазон изменения площади $F_{с.кр}$ уменьшается.



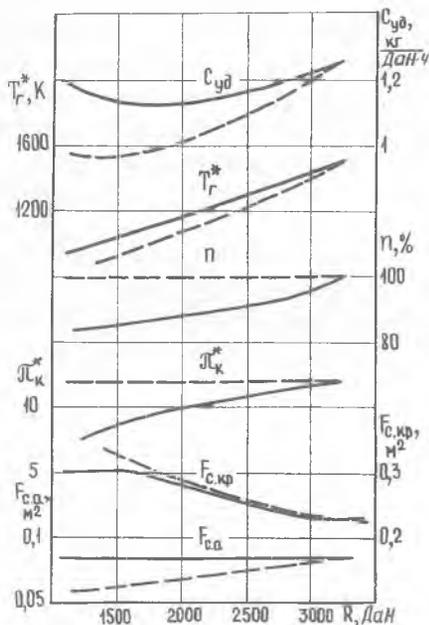
Р и с.5.21.Закономерности изменения степени понижения давления $\pi_{г}^*$ и площади $F_{с.кр}$ при фиксированном положении рабочей точки на характеристике компрессора для $T_{г0}^* = 1600\text{K}$, $G_{г0} = 100 \text{ кг/с}$:
 — $\pi_{к0}^* = 3$; — — $\pi_{к0}^* = 6$;
 - - - $\pi_{к0}^* = 12$



Р и с.5.22.Закономерности изменения степени понижения давления $\pi_{г}^*$ и площади $F_{с.кр}$ при фиксированном положении рабочей точки на характеристике компрессора для $\pi_{к0}^* = 12$, $G_{г0} = 100 \text{ кг/с}$:
 — $T_{г0}^* = 1200$; — — $T_{г0}^* = 1600$;
 - - - $T_{г0}^* = 2000\text{K}$

Переход рассматриваемого двигателя с максимального режима на крейсерский может быть выполнен также при условии фиксированного положения рабочей точки на характеристике компрессора. В этом слу-

чае тяга уменьшается только за счет снижения температуры T_r^* при $\pi_k^* = const$ при постоянном расходе воздуха. Такое регулирование позволяет снизить удельный расход топлива на 5-10% по сравнению с $C_{уд}$ на двигателе с $F_{с,кр} = var$ (рис. 5.23) и на 10-20% по сравнению с $C_{уд}$ на двигателе с нерегулируемыми сечениями (см. рис. 5.13).



Р и с. 5.23. Сравнение дроссельных характеристик одновального ТРД с тремя и двумя регулируемыми факторами ($T_{r,г}^* = 1600$ К, $\pi_{k,г}^* = 12$, $C_{в,г} = 100$ кг/с, $H = 1$ км, $M_{г} = 1$):

— $F_{с,кр} = var$; - - - $F_{с,кр} = var$; $F_{с,а} = var$

ния, выбранных из условия фиксированного положения рабочей точки на характеристике компрессора. Возможный диапазон применения ограничивается предельной расширительной способностью турбины [32].

Для увеличения предельной расширительной способности и расширения диапазона возможного применения рассматриваемых закона и программы регулирования необходимо при проектировании тур-

Законмерности изменения площадей $F_{с,а}$ и $F_{с,кр}$ в зависимости от $T_{r,г}^*$, полученные при анализе закона регулирования двигателя на максимальном режиме (см. рис. 5.21 и 5.22), справедливы и для рассматриваемой программы регулирования. Разница только в том, что в первом случае приведенная температура $T_{r,г}^*$ изменяется за счет изменения полной температуры на входе в двигатель T_H^* при $T_r^* = const$ (и этот график можно построить по T_H^*), а во втором - за счет изменения T_r^* при $T_H^* = const$.

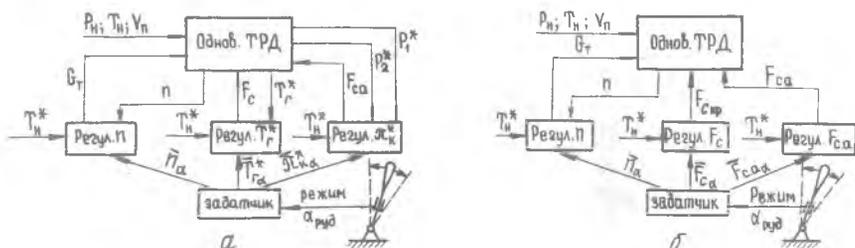
При снижении температуры $T_{r,г}^*$ значительно увеличивается степень понижения давления в турбине (см. рис. 5.22), что сопровождается уменьшением КПД η_r^* и снижает эффективность применения закона и программы регулирования,

бины принимать коэффициент скорости за турбиной λ_{T_D} на нижнем пределе рекомендуемых значений.

ТРД с тремя регулирующими факторами имеет три параметра регулирования и соответственно три регулятора. Для простоты можно представить следующее распределение регулирующих факторов по параметрам регулирования (рис. 5.24 а):

$$G_T \rightarrow n; F_{c.kp} \rightarrow T_r^*; F_{c.a} \rightarrow \pi_k^*.$$

Совместная работа трех замкнутых регуляторов обычно не обеспечивает приемлемых характеристик динамики процесса регулирования. Динамику процесса можно значительно улучшить, если в систему регулирования задать закон изменения площадей $F_{c.a}$ и $F_{c.kp}$ в зависимости от T_r^* и программу их изменения по углу α_{pud} , которые определяются из условия обеспечения заданного закона и программы изменения величин T_r^* и π_k^* . Структурная схема, соответствующая косвенному регулированию величин T_r^* и π_k^* , показана на рис. 5.24 б.



Р и с. 5.24. Структурные схемы регулирования одновального ТРД с тремя регулирующими факторами: а - замкнутое регулирование n , T_r^* и π_k^* ; б - незамкнутое регулирование площадей $F_{c.kp}$ и $F_{c.a}$

5.2.3. Особенности работы турбокомпрессора (ТРД) с регулирующими направляющими аппаратами (НА) и перепуском воздуха из компрессора

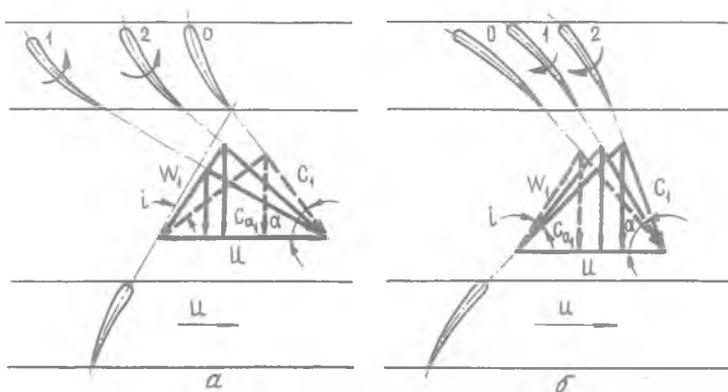
В 5.2.1 и 5.2.2 показано, что наличие трех регулирующих факторов позволяет обеспечить устойчивую работу в широком диапазоне и наиболее полно использовать возможности двигателя по температуре T_r^* и частоте n . Однако создание регулируемого соплового аппарата турбины для ТРД с высокими параметрами цикла

является трудной задачей, в связи с этим двигатели с $F_{с,кр} = va\alpha$, $F_{с,а} = va\alpha$ пока не получили распространения.

Более распространены различные способы управления компрессором с целью обеспечения его устойчивой работы в широком диапазоне летных условий. К ним относятся прежде всего регулирование НА и перепуск воздуха из средних ступеней компрессора.

ТРД с регулируемыи НА компрессора. Как известно, отклонение величины $n_{пр}$ от ее расчетного значения ведет к рассогласованию работы ступеней компрессора. При низких $n_{пр}$ осевые скорости на последних ступенях возрастают, а углы атаки становятся отрицательными. При этом осевые скорости на первых ступенях уменьшаются, а углы атаки увеличиваются.

Для уменьшения углов атаки и увеличения запасов устойчивой работы компрессора направляющие аппараты первых ступеней необходимо прикрывать, увеличивая закрутку потока перед рабочим колесом, а углы установки лопаток направляющих аппаратов последних ступеней изменять в противоположную сторону. Значительное прикрытие лопаток НА первых ступеней при несущественном изменении углов установки лопаток НА последних ступеней (см. положение I на рис. 5.25 [32])



Р и с.5.25. Влияние поворота лопаток направляющих аппаратов компрессора на треугольники скоростей в первой (а) и последней (б) ступенях при пониженных $n_{пр}$:

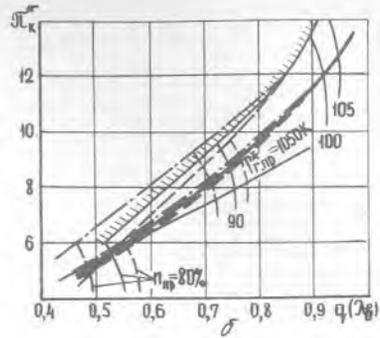
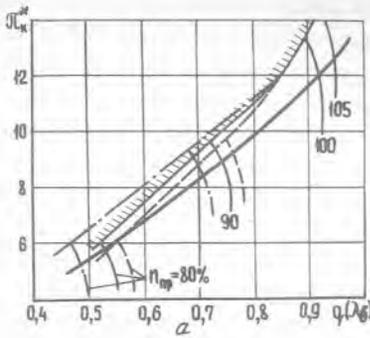
— — — — — - нерегулируемый компрессор (положение 0);
 ————— - регулирование направляющих аппаратов на $\Delta K_{у,макс}$
 (положение I) и $C_{в,макс}$ (положение 2)

ведет к снижению расхода воздуха, уменьшению углов атаки, улучшению обтекания, уменьшению отрыва потока, повышению КПД и запаса

сов устойчивости компрессора. Наоборот, существенное раскрытие НА последних ступеней при незначительном изменении углов установки лопаток НА первых ступеней (см. положение 2 на рис. 5.25) обуславливает увеличение расхода воздуха через компрессор при низких n_{np} , но запасы устойчивой работы при этом не увеличиваются и даже могут снижаться. В соответствии с этим различают регулирование на повышение ΔK_y и на повышение расхода воздуха. Подробно влияние регулирования НА компрессора на его характеристики изложено в [1], а также в [32].

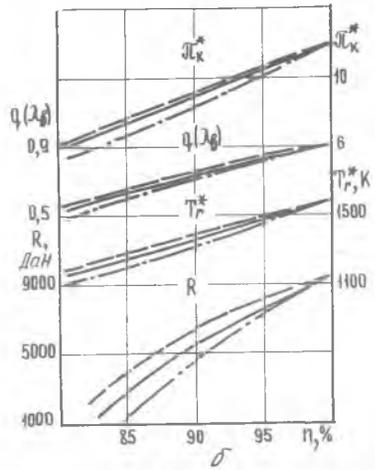
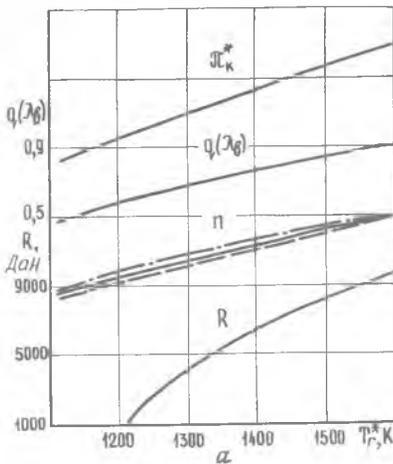
Обычно углы установки лопаток НА первых и последних ступеней компрессора регулируются в зависимости от приведенной частоты вращения ротора и однозначно определяются ею. В этом случае параметры компрессора π_k^* и η_k^* , как и двигателя с нерегулируемыми НА, являются функцией двух переменных $\pi_k^* = f[n_{np}, q(\lambda_B)]$, $\eta_k^* = f[n_{np}, q(\lambda_B)]$. Регулирование НА только изменяет характеристику компрессора: при регулировании на повышение ΔK_y на низких n_{np} граница помпажа сдвигается вверх, а напорные ветви характеристики при $n_{np} = const$ сдвигаются в сторону меньших значений $q(\lambda_B)$; при регулировании на G_{Bmax} наблюдается противоположное изменение указанных факторов (рис. 5.26). Поэтому влияние регулирования НА компрессора на совместную работу узлов и характеристики ТРД по существу сводится к оценке влияния особенностей характеристики компрессора.

На двигателе с нерегулируемыми турбиной и соплом расположение линии совместной работы в поле характеристик компрессора при заданных π_{k0}^* и $q(\lambda_B)_0$ зависит от характеристики компрессора только при изменении КПД η_k^* . Если изменением КПД, вызванным поворотом НА, пренебречь, то при регулировании НА положение линии совместной работы (см. рис. 5.26, а), а также обобщенные характеристики, построенные по температуре T_{cnp}^* , остаются неизменными. На этих характеристиках изменяется только приведенная частота вращения ротора: увеличивается при регулировании компрессора на ΔK_{ymax} , уменьшается при регулировании компрессора на G_{Bmax} (рис. 5.27, а). Таким образом, при прикрытии лопаток НА первых ступеней те же характеристики обеспечиваются на больших частотах n_{np} , а при раскрытии НА последних ступеней — на меньших n_{np} . Естественно, что при регулировании двигателя по закону $n = const$ поворот НА приводит к значительному изменению всех параметров, в том числе, тяги двигателя: прикрытия НА первых ступеней ведет к уменьшению тяги (рис. 5.27, б).



Р и с. 5.26. Положение линии совместной работы на характеристике компрессора с поворотными аппаратами для одновалного ТРД, регулируемого при условии $F_{с.кр} = const(a)$ и по закону $T_r^* = const$ при $F_{с.кр} = var(\delta)$:

- — — — — нерегулируемый компрессор;
- — — — — регулирование на $\Delta \kappa_{у макс}$;
- — — — — регулирование на $C_{\beta макс}$



Р и с. 27. Обобщенные характеристики ($T_H^* = 288 K$, $P^* = 101325 Pa$) одновалного ТРД ($T_{гв}^* = 1600 K$, $\pi_{\kappa,р}^* = 12$, $C_{\beta 0} = 100 \text{ кг/с}$, $M_{гв} = 0$) с регулируемым направляющим аппаратами компрессора при $F_{с.кр} = const$, построенные по T_r^* (а) и $\pi_{\kappa,р}$ (б) (см. обозначения на рис. 5.26)

При регулировании компрессора на $\Delta K_{y, \max}$ в зоне низких n_{np} КПД η_k^* , как отмечалось, несколько повышается. Это ведет к незначительному смещению линии совместной работы вниз и улучшению характеристик двигателя. При $T_r^* = const$ увеличивается степень повышения давления, расход воздуха, удельная и полная тяга и снижается удельный расход топлива. Влияние η_k^* на совместную работу узлов и характеристики рассматривается в § 4.4 и 4.7 [16].

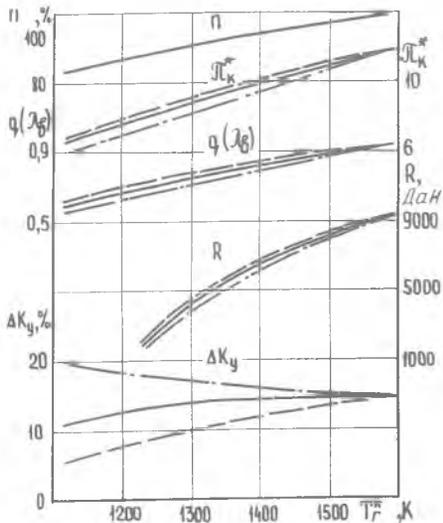
Если на ТРД с $F_{c,кр} = var$, регулируемом по закону $T_r^* = const$, $n = const$, прикрыть лопатки НА первых ступеней, то рабочая точка на характеристике компрессора смещается по линии $T_{r, np}^* = const$ влево-вниз при одновременном смещении напорной ветви характеристики компрессора при низких n_{np} , что обеспечивается за счет уменьшения площади $F_{c,кр}$. При этом линия совместной работы незначительно смещается вверх (см. рис. 5.26, б). Если в рассматриваемом случае раскрыть лопатки НА последних ступеней, то линия совместной работы смещается несколько вниз. Тем не менее, максимальные запасы обеспечиваются в первом случае, несмотря на уменьшение площади $F_{c,кр}$, так как преобладающее влияние на ΔK_y оказывает смещение границы помпажа за счет регулирования компрессора на $\Delta K_{y, \max}$. Такое регулирование компрессора является наиболее эффективным средством увеличения ΔK_y и получило широкое распространение.

На ТРД с поворотными НА компрессора и с $F_{c,кр} = var$, регулируемом по закону $T_r^* = const$, $n = const$, больший расход воздуха и соответственно большая тяга обеспечиваются при регулировании компрессора на $G_B \max$ и, наоборот, наименьшие G_B и R обеспечиваются при регулировании компрессора на $\Delta K_{y, \max}$ (рис. 5.28).

Следовательно, компрессор с высокой степенью повышения давления π_{k0}^* , имеющий минимальные запасы устойчивости при низких n_{np} , целесообразно регулировать на $\Delta K_{y, \max}$, а компрессор с умеренной π_{k0}^* , имеющий достаточно высокие запасы устойчивости при низких n_{np} и предназначенный для больших сверхзвуковых скоростей полета, целесообразно регулировать на $G_B \max$.

ТРД с перепуском воздуха из средних ступеней компрессора.

На режимах запуска и на низких, преимущественно нерабочих, режимах для обеспечения устойчивой работы компрессора широко



Р и с. 5.28. Обобщенные характеристики ($T_{Г}^* = 288 \text{ К}$, $P_{Г} = 101325 \text{ Па}$) одно-вального ТРД с поворотными направляющими аппаратами ($T_{Г0}^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{к0}^* = 12$, $G_{Б0} = 100 \text{ кг/с}$, $M_{Г0} = 0$), регулируемого по закону $T_{Г}^* = \text{const}$, $n = \text{const}$ (см. обозначения на рис. 5.26)

применяется перепуск (выпуск) воздуха из средних ступеней компрессора в атмосферу. Анализ работы двигателя с перепуском представляет известные трудности, так как на этих режимах наблюдается неодинаковый расход воздуха через двигатель и входное сечение компрессора, изменяется КПД $\eta_{к}^*$ и, наконец, изменяется сама характеристика компрессора.

Для оценки эффективности работы компрессора с перепуском воздуха в атмосферу и упрощения уравнения мощности вводится понятие эффективного КПД:

$$\eta_{к эр}^* = \frac{L_{к эр} G_{Бк}}{N_{к}}$$

где $N_{к}$ — мощность, подведенная к компрессору на режимах перепуска;

$G_{Бк}$ — расход воздуха через выходное сечение компрессора.

С помощью этого коэффициента учитывается и потеря мощности на сжатие перепускаемого воздуха. Поэтому коэффициент изменения массы $\gamma_{Б-к}$, учитывающий перепуск воздуха, не будет входить в уравнение мощности. Уравнение мощности (I.16), см. [15], для работы ТРД ($\gamma_{отб} = 1$) на режимах перепуска можно записать в следующем виде:

$$\frac{L_{к эр}}{\eta_{к эр}^*} = L_{Г} \gamma_{к-Г} \eta_{м} \quad (5.12)$$

Заметим, что в уравнении неразрывности (I.14) коэффициент изменения массы $\gamma_{Б-Г}$ учитывает и перепуск воздуха.

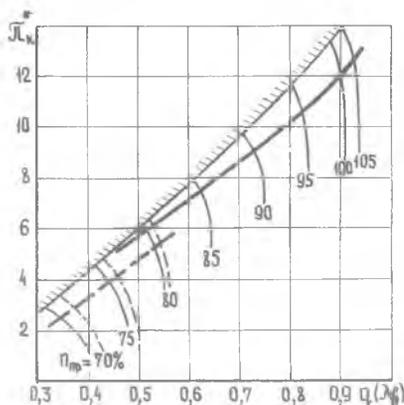
В результате совместного решения уравнений (I.14) и (5.12) по-

лучим

$$\frac{\pi_k^*}{\sqrt{\ell_{k,a\partial} / \eta_{k,эф}^*}} = q(\lambda_{\beta}) \nu_{\beta-k} \sqrt{\frac{G_p \nu_{k-r}}{C_{pr} \ell_T \eta_m}} \frac{241 F_{\beta}}{\sigma_{k\sigma} G_{pp-r}} \quad (5.13)$$

Из уравнения (5.13) следует, что при включении перепуска (снижении $\nu_{\beta-k}$) линия совместной работы смещается вправо-вниз. Если не учитывать изменение эффективного КПД, то при включении перепуска относительная плотность тока при $\pi_k^* = const$ увеличивается обратно пропорционально снижению $\nu_{\beta-k}$. (Если на характеристике компрессора по оси абсцисс отложить произведение $q(\lambda_{\beta}) \nu_{\beta-k} = [q(\lambda_{\beta})]_k$, которое представляет собой долю функции $q(\lambda_{\beta})$, пропорциональную расходу воздуха на выходе из компрессора, как это сделано в [32], то в рассматриваемом случае включение перепуска не приведет к изменению положения линии совместной работы, а уравнение (5.13) не будет отличаться от уравнения совместной работы узлов без перепуска). В действительности линия совместной работы смещается чуть меньше (рис. 5.29), так как при этом в большинстве случаев снижается эффективный КПД $\eta_{k,эф}^*$.

При включении перепуска сопротивление за группой первых ступеней падает, расход воздуха через них возрастает, осевые скорости увеличиваются, что ведет к снижению углов атаки. При этом расход $G_{\beta,k}$ через группу ступеней, стоящих за перепуском, уменьшается, снижаются осевые скорости и углы атаки, улучшается обтекание венцов, что сопровождается увеличением действительного КПД η_k^* . Это увеличение тем значительнее, чем ниже приведенная частота и больше рассогласование ступеней. Эффективный КПД компрессора $\eta_{k,эф}^*$ при включении перепуска в большинстве случаев снижается,



Р и с.5.29. Линия совместной работы на характеристике компрессора с перепуском воздуха из средних ступеней:

— без перепуска;
 - - - с перепуском

так как он учитывает, как отмечалось, затраты мощности на сжатие перепускаемого воздуха. При весьма низких n_{np} эффективный КПД может увеличиваться, так как рост действительного КПД оказывает на него в этом случае преобладающее влияние.

Степень повышения давления первых ступеней уменьшается при включении перепуска, если они работают в правой ветке своих характеристик, или увеличивается, если они работают в левой ветке. Последнее характерно для низких n_{np} . Степень повышения давления группы задних ступеней незначительно повышается. Суммарная степень повышения давления π_k в широком диапазоне режимов снижается, а при низких n_{np} может и увеличиваться. В последнем случае практически не снижается расход воздуха через двигатель (через сечение на выходе из компрессора). Напорные ветки характеристики компрессора при $n_{np} = const$ при включении перепуска сдвигаются вправо-вверх в сторону увеличения $g(\lambda_B)$ и π_k^* и тем значительнее, чем ниже n_{np} (см. рис. 5.29). При этом положение границы помпажа изменяется незначительно (граница помпажа сильно смещается влево, если она построена в координатах $\pi_k^* = f[g(\lambda_B)]_k$).

В результате включение перепуска приводит к значительному увеличению запасов устойчивой работы компрессора.

При работе двигателя с перепуском температура газа перед турбиной возрастает при $n = const$, чем компенсируется снижение эффективного КПД $\eta_{к.эп}^*$ и, следовательно, увеличение мощности, потребной на вращение компрессора, см. уравнение (5.12). Соответственно возрастает температура за турбиной. Степень расширения газа в сопле снижается вследствие снижения π_k^* . При этом удельная тяга изменяется незначительно, а полная тяга снижается главным образом вследствие уменьшения расхода воздуха через двигатель. Удельный расход топлива повышается (цикл становится неэффективным) в основном из-за того, что часть мощности турбины затрачивается на сжатие перепускаемого воздуха, который полезной работы не совершает, см. рис. 3.7 [15].

Проведенный анализ влияния перепуска на тягу и удельный расход топлива справедлив для сравнительно высоких значений n_{np} . При весьма низких n_{np} перепуск воздуха из компрессора практически не ухудшает (а может даже незначительно улучшить) характеристики двигателя благодаря повышению эффективного КПД $\eta_{к.эп}^*$,

существенному смещению напорных веток на характеристике компрессора вправо и соответствующему повышению величин π_{λ}^* и C_{β} .

Таким образом, перепуск воздуха из средних ступеней компрессора в атмосферу является эффективным средством увеличения запасов устойчивой работы $\lambda_{K\psi}$, но сопровождается значительным ухудшением характеристик двигателя. Поэтому перепуск обычно применяют на низких (например, на режимах запуска и малого газа) или нерабочих (промежуточных) режимах.

Для повышения эффективности двигателя более целесообразно перепускать воздух из средних ступеней компрессора за турбину, т.е. переходить к схеме ТРДД с невысокой степенью двухконтурности и смещением потоков (см. § 4.6 [16]).

§ 5.3. Особенности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов и характеристики

многовальных ТРДД и ТРД

5.3.1. Особенности влияния площади сопла

Как следует из анализа совместной работы двухвальной турбины и сопла (см. раздел 1.2 [15]), с изменением площади сопла изменяется степень понижения давления в турбине нд. При этом на основных рабочих режимах коэффициент скорости в минимальном сечении соплового аппарата $\lambda_{сатнд}$, а следовательно, и приведенный расход газа через турбину нд $C_{пргнд}$ сохраняются практически неизменными. Вследствие этого несущественно изменяется и величина $\pi_{гвд}^*$. Таким образом изменение площади сопла оказывает незначительное влияние или практически не влияет на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД и положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД двухвальных и, тем более, многовальных ТРДД и ТРД.

Влияние площади сопла на совместную работу узлов турбокомпрессора нд и параметры двухвального ТРД (а затем ТРДД) рассмотрим при $T_c^* = const$.

С увеличением площади F_{5LKp}^* степень понижения давления $\pi_{тнд}^*$, а следовательно и располагаемая мощность турбины нд, увеличиваются. Это приводит к увеличению частоты вращения ротора нд; соответственно увеличиваются $\pi_{кнд}^*$ и $q(\lambda_{\beta})$, см. уравнения (4.8) и (4.12), [16], и снижается скольжение роторов, что

приводит, как показано в § 4.1, к смещению линии совместной работы на характеристике компрессора НД к границе помпажа и к соответствующему снижению запасов устойчивой работы.

Таким образом, увеличение площади $F_{с.кр}$ в системе двухвального ТРД ведет не к увеличению запасов устойчивой работы компрессора, как на одновальном ТРД, а к их уменьшению.

При этом рабочая точка на характеристике компрессора ВД незначительно смещается по линии совместной работы влево-вниз вследствие увеличения температуры потока воздуха $T_{ввд}^*$ перед этим компрессором, что сопровождается снижением величин $\pi_{к.вд}^*$, $q(\lambda_{ввд})$ и $\rho_{пр.ввд}$.

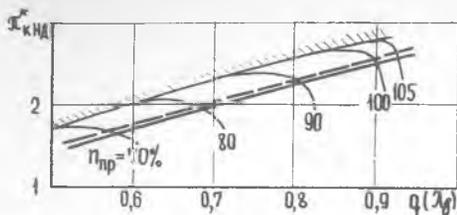
Удельные параметры и тяга двухвального ТРД с изменением площади сопла при $T_{г}^* = const$ изменяются примерно так же, как и на одновальном ТРД: с увеличением $F_{с.кр}$ тяга увеличивается при низких и средних частотах вращения роторов вследствие увеличения расхода воздуха и $\pi_{к}^*$, а удельный расход топлива снижается. При высоких $\rho_{пр}$ тяга уменьшается из-за снижения КПД компрессора $\eta_{к.нд}^*$.

Из анализа следует, что применение регулирования $F_{с.кр}$ для увеличения запасов $\Delta K_{унд}$ в условиях работы двухвального ТРД при высоких числах $M_{пр}$ (низких $\rho_{пр}$) затруднительно, так как для увеличения $\Delta K_{унд}$ необходимо увеличить скольжение, т.е. снизить $V_{г.кр}$, что сопровождается уменьшением тяги на максимальном режиме и увеличением удельного расхода топлива на крейсерском.

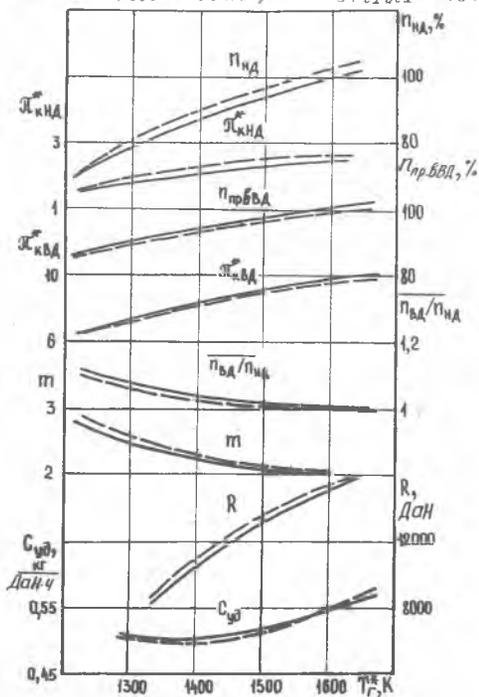
Характер влияния площади $F_{с.кр}$ на параметры двухвального ТРД (как и одновального ТРД) зависит от тех же факторов и, кроме того - от распределения работы между каскадами компрессора. С увеличением $\pi_{к.пр}^*$ при $\pi_{к.вд}^* = const$ влияние площади сопла на тягу и удельный расход топлива возрастает (табл. 5.3).

Аналогичное влияние оказывает изменение площади сопла внутреннего контура на совместную работу узлов и обобщенные характеристики двухвального ТРД (рис. 5.30 и 5.31).

Особенностью двухконтурного двигателя является то, что с увеличением $F_{с.кр.1}$ при $T_{г}^* = const$ увеличивается степень двухконтурности, см. формулу (4.11), так как уменьшается приведенная плотность тока на входе в компрессор ВД $q(\lambda_{ввд})$, т.е. снижается пропускная способность внутреннего контура. Поэтому на ТРДД наблюдается меньшее изменение работы компрессора $\Delta K_{нд} q$ а



Р и с. 5.30. Влияние площади сопла внутреннего контура на положение линии совместной работы на характеристике компрессора НД двухвального ТРДД ($T_{г0}^* = 1600$ К, $\pi_{к.г0}^* = 25$, $m_0 = 2$, $\pi_{к.НД}^* = 2,5$):
 $F_{с.кр.исх} = 0,334 \text{ м}^2$; --- $\Delta F_{с.исх} = +10\%$



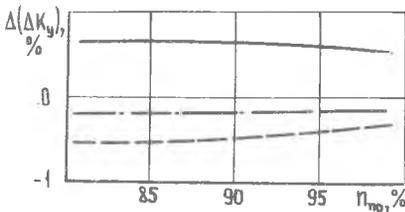
Р и с. 5.31. Обобщенные характеристики двухвального ТРДД с $F_{с.кр.г} = \text{var}$ при $M_0 = 0$ (см. обозначения и параметры на рис. 5.30)

Таблица 5.3

		$\pi_{кЭ0}^* = 12; T_0^* = 1600 \text{ К}$					
Кoeffици- ент влия- ния	M_{11}	0			2,2		
	$T_{пр}^*$	$\pi_{кНД0}^*$	2,4	3,47	4	2,4	3,47
σ_R	I	I,7	I,6	3	I,I	I,4	2,5
$\sigma_{F_{сгр}}$	0,8	I,I	I,7	2,5	I	I,4	2
	0,7	0,4	2,2	3	I	I,4	2
$\sigma_{C_{y\theta}}$	I	-0,3	-0,3	-0,4	-0,07	-0,07	-0,I
$\sigma_{F_{сгр}}$	0,8	-0,3	-0,4	-0,5	-0,07	-0,I	-0,I2
	0,7	-0,3	-0,6	-I	-0,07	-0,I2	-0,I5

следовательно частоты $n_{нд}$ и скольжения $n_{вд}/n_{нд}$, что приводит к незначительному изменению степени повышения давления $\pi_{кНД}^*$, расходов воздуха через оба контура и расхода топлива. По этой причине изменения тяги по сравнению с ТРД невелики.

Кроме того, вследствие увеличения степени двухконтурности при возрастании $F_{сгр}$ частично компенсируется повышение сопротивления за компрессором Нд ТРДд, обусловленное уменьшением скольжения роторов. Благодаря этому линия совместной работы на характеристике компрессора Нд ТРДд с увеличением $F_{сгр}$ сдвигается к границе помпажа меньше, чем на аналогичной характеристике ТРД. Соответственно меньше снижаются и запасы устойчивой работы $\Delta K_{унд}$ (рис. 5.32).



Р и с. 5.32. Изменение запасов устойчивой работы $\Delta(Ky) = \Delta K_{y} - \Delta K_{y,св}$ компрессора Нд двухвалных ТРД (— — —) и ТРДд (— — —) и компрессора одновалного ТРД (— — —) при увеличении площади сопла $F_{сгр}$ на 1% (параметры ТРДд см. на рис. 5.30) Параметры ТРД: $T_0^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{кЭ0}^* = 12$, $\pi_{кНД0}^* = 3,47$

На рис. 5.32 показано также изменение запасов $\Delta(\Delta K_y)$ за счет изменения площади сопла $F_{с кр}$ в системе одновального ТРД. Из рисунка видно, что на двухвальном ТРД площадь $F_{с кр}$ оказывает меньшее влияние на $\Delta K_{чнд}$, чем на одновальном.

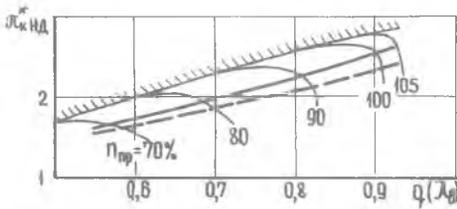
С увеличением степени двухконтурности в исходной расчетной точке m_0 коэффициенты влияния площади $F_{с1кр}$ на параметры ТРДД уменьшаются (табл. 5.4). Увеличение параметров цикла не приводит к их существенному изменению.

Т а б л и ц а 5.4

Коэффициент влияния	M_{II}	0				2,2		
	$T_{г0}^*, K$	1600	1600	1600	1200	1600	1600	1200
	$\pi_{к0}^*$	25	25	25	12	25	25	12
	$\frac{m_0}{T_{г.пр}^*}$	1	2	6	1	1	2	1
$\frac{\partial R}{\partial F_{с1}}$	1	0,2	0	0	0,2	0,2	0,1	0,2
	0,9	0,3	0,15	0,04	0,3	0,4	0,1	0,4
	0,8	0,35	0,2	0,07	0,35	0,5	0,3	0,6
$\frac{\partial C_{уд}}{\partial F_{с1}}$	1	-0,1	-0,1	0,05	-0,1	-0,2	0	0
	0,9	-0,15	-0,1	0,01	-0,1	-0,1	0	-0,1
	0,8	-0,15	-0,1	0	-0,1	0	-0,1	-0,2

Коэффициенты влияния площади сопла $F_{с1кр}$ на тягу ТРДД значительно меньше, чем аналогичные коэффициенты влияния на ТРД (сравни табл. 5.4 и 5.3). Объясняется это главным образом тем, что изменение $F_{с1кр}$ приводит к перераспределению энергии между контурами, при этом суммарный подвод энергии (расхода топлива) изменяется незначительно. При увеличении $F_{с1кр}$ выигрыш от незначительного увеличения расхода топлива, а также степени двухконтурности, частично обесценивается неоптимальным перераспределением энергии между контурами или снижением КПД компрессора.

Изменение площади сопла наружного контура оказывает на большую часть параметров противоположное влияние по сравнению с изменением площади сопла внутреннего контура. С увеличением $F_{с2кр}$ снижается сопротивление на выходе из наружного контура, вследствие чего уменьшается давление за компрессором НД (линия совместной ра-

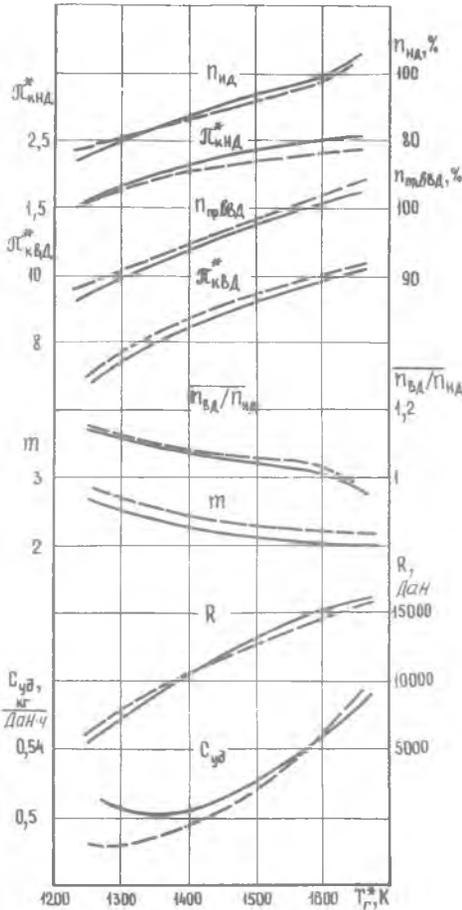


Р и с. 5.33. Влияние площади сопла наружного контура на положение линии совместной работы на характеристике компрессора НД двухвального ТРДД ($T_{г0}^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{к\text{вд}}^* = 25$, $m_0 = 2$, $\lambda_{кнд0}^* = 2,5$):

$$F_{с.дкр.исх} = 0,409 \text{ м}^2;$$

$$\sigma F_{с.дкр} = +10\%.$$

Р и с. 5.34. Обобщенные характеристики двухвального ТРДД с $F_{с.дкр} = \text{const}$ при $M_{г0} = 0$ (см. обозначения и параметры на рис. 5.33)



боты на характеристике смещается вниз, рис. 5.33), увеличиваются запасы $\Delta K_{унд}$ и изменяется КПД $\eta_{кнд}^*$. Расход воздуха через наружный контур увеличивается, а через внутренний уменьшается. В результате степень двухконтурности увеличивается (рис. 5.34).

По изменению степени двухконтурности и КПД компрессора НД определяется изменение всех остальных параметров, в том числе, скольжение частот вращения роторов, а также удельных параметров и тяги.

Снижение работы компрессора $\lambda_{кнд}$, вызванное увеличением степени двухконтурности, сопровождается одновременным уменьшением температуры $T_{гвд}^*$, что ведет к увеличению

$$\lambda_{квд}^*, \quad q(\lambda_{квд}) \text{ и } \pi_{квд}^*$$

рабочая точка на характеристике компрессора ВД смещается по линии совместной работы вправо-вверх.

В зоне высоких приведенных частот вращения ротора НД смещенные линии совместной работы вниз при увеличении $F_{c \text{ в } \text{кр}}$ сопровождается значительным снижением КПД $\eta_{\text{кнд}}^*$, что ведет к уменьшению $n_{\text{нд}}$ и увеличению $n_{\text{вд}} / n_{\text{нд}}$. При этом уменьшается расход воздуха через двигатель и тяга. В зоне низких $n_{\text{нд пр}}$ смещенные линии совместной работы на характеристике компрессора НД вниз приводит к незначительному снижению и даже увеличению $\eta_{\text{кнд}}^*$. Соответственно увеличивается частота $n_{\text{нд}}$ и расход воздуха через двигатель.

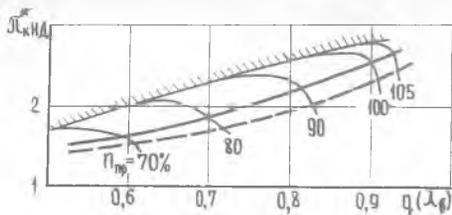
В зоне низких и средних частот вращения роторов удельный расход топлива снижается благодаря увеличению степени двухконтурности. В зоне высоких $n_{\text{пр}}$ удельный расход увеличивается вследствие снижения КПД $\eta_{\text{кнд}}^*$.

Изменение площади сопла в системе двухконтурного ТРДД со смещением потоков (см. схему на рис. 4.42 [16]) соответствует одновременному изменению площадей сопел наружного и внутреннего контуров, если при этом не возникает критическая скорость на выходе из контуров, т.е. при невысоких (существенно докритических) скоростях на входе в камеру смешения. При низких степенях двухконтурности на параметры двигателя преобладает влияние, эквивалентное изменению площади сопла внутреннего контура; при высоких – эквивалентное изменению площади сопла наружного контура.

На рис. 5.35 и 5.36 показано влияние площади $F_{c \text{ кр}}$ на положение линии совместной работы и характеристики двухвального ТРДД со смешением потоков при $m_0 = 2$. Увеличение площади сопла позволяет значительно увеличить расход воздуха через двигатель (особенно при низких $n_{\text{нд пр}}$) без снижения запасов устойчивой работы, и даже при их увеличении. Такое увеличение расхода может дать значительную прибавку в тяге на двигателях с форсажной камерой при больших скоростях полета.

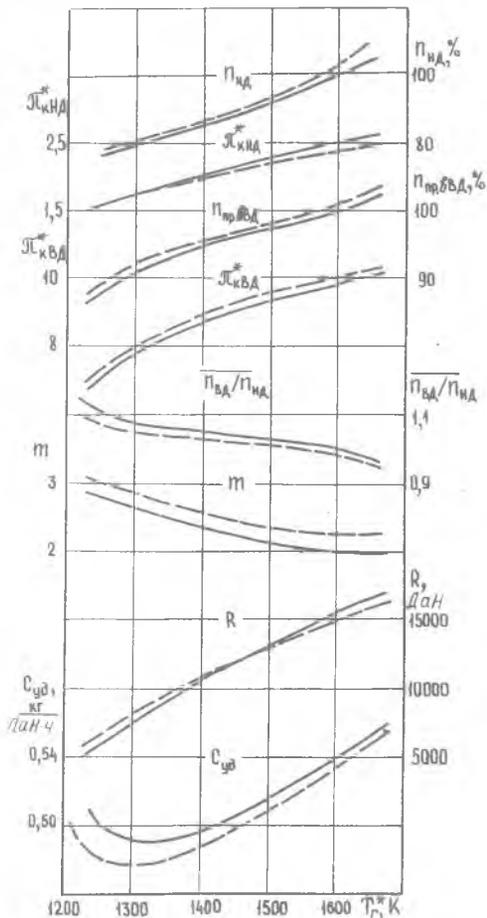
5.3.2. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины ВД

Изменение площади соплового аппарата турбины ВД $F_{c \text{ а вд}}$ оказывает на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД и на положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД



Р и с. 5.35. Влияние площади сопла $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора НД двухвального ТРДД со смешением потоков ($T_{г0}^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{к.нд0}^* = 25$, $\pi_{г0} = 2$, $\pi_{к.нд0} = 2,5$):

— $F_{с.кр.исх} = 0,791 \text{ м}^2$;
 - - $\delta F_{с.кр} = + 10\%$.

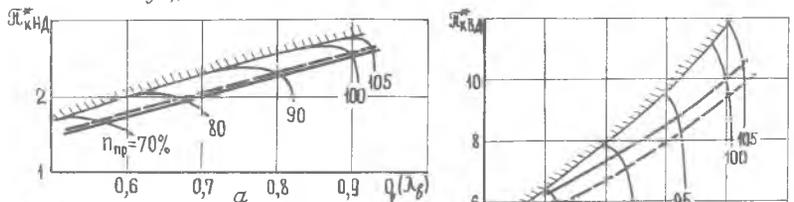


Р и с. 5.36. Обобщенные характеристики двухвального ТРДД со смешением потоков с $F_{с.кр} = \text{var}$ при $M_{г0} = 0$ (см. обозначения и параметры на рис. 5.35)

двухвальных ТРД и ТРД такое же влияние, как и на турбокомпрессор одновального ТРД (см. § 5.2).

Увеличение площади $F_{с.вд}$ при $T_r^* = const$, сопровождающееся снижением $\pi_{твд}^*$, $L_{твд}$, $L_{квд}$ и $n_{вд}$, ведет к уменьшению скольжения роторов, увеличению сопротивления за компрессором НД, смещению линии совместной работы на его характеристике к границе помпажа.

В результате запасы устойчивости компрессора низкого давления $\Delta K_{унд}$ снижаются, как и при увеличении площади сопла $F_{сткр}$, а запасы $\Delta K_{увд}$ повышаются (рис. 5.37).

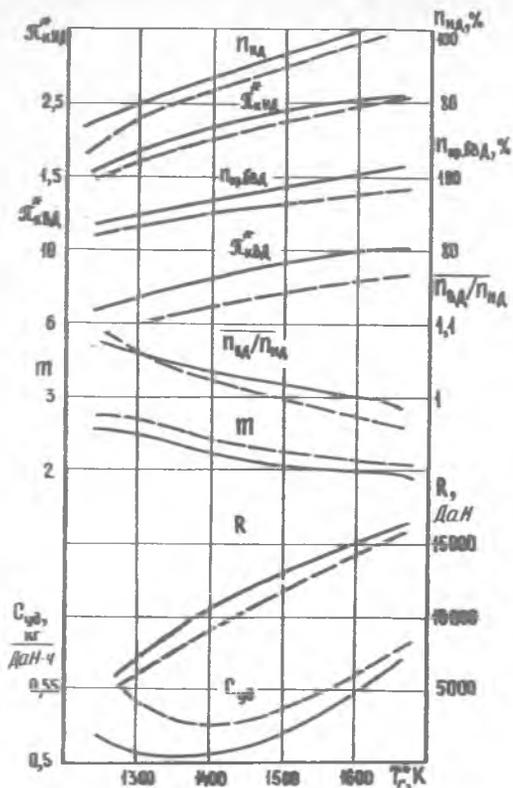


Р и с.5.37. влияние площади $F_{с.авд}$ на положение линий совместной работы на характеристиках компрессоров НД (а) и ВД (б) двухвального ТРДД ($T_r^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{кст0}^* = 25$, $m_0 = 2$, $\pi_{кнд}^* = 2,5$):

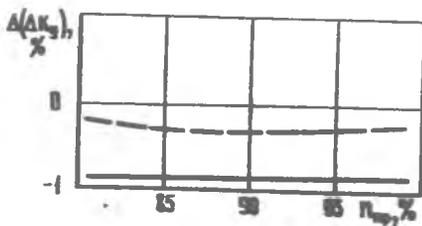
— $F_{с.авдисх} = 0,0403 \text{ м}^2$; --- $\delta F_{с.авд} = +10\%$.

Особенно уменьшается скольжение роторов и снижаются запасы $\Delta K_{унд}$ в системе двухвального ТРД, так как кроме снижения $n_{вд}$ здесь увеличивается частота вращения ротора НД: увеличение температуры $T_{гнд}^*$, а следовательно и работы $L_{тнд}$, обусловленное снижением $L_{твд}$, ведет к увеличению работы компрессора $L_{кнд}$ и соответственно частоты $n_{нд}$.

Особенность ТРДД заключается в том, что увеличение степени двухконтурности, обусловленное снижением $q(\lambda_{фвд})$, оказывает на величину $L_{кнд}$ (см. уравнение мощности (4.7), [16]) и частоту вращения $n_{нд}$ преобладающее влияние. Поэтому увеличение $F_{с.авд}$ ведет к снижению $n_{нд}$ (рис.5.38) и к менее значительному снижению скольжения $n_{вд}/n_{нд}$. Увеличение степени двухконтурности и отмеченные особенности изменения характера скольжения роторов способствуют тому, что запасы устойчивой работы компрессора НД в системе двухконтурного двигателя при увеличении $F_{с.авд}$, как и при увеличении $F_{сткр}$, снижаются меньше, чем в системе двухвального ТРД (рис. 5.39).



Р и с. 5.38.Обобщенные характеристики двухвального ТРДД с $c_{савк} = \text{vaz}$ при $M_1=0$ (см.обозначения и параметры на рис.5.37)



Р и с.5.39.Изменение запасов устойчивой работы компрессора НД $\Delta(\Delta K_y) = \Delta K_y - \Delta K_{y,уст}$ при увеличении площади $c_{савк}$ на 1%:

- ТРД, $T_1^* = 1600\text{K}$, $\pi_{k*}^* = 12$, $\pi_{k_{НН0}}^* = 3,47$
- - - ТРДД, $T_1^* = 1600\text{K}$, $\pi_{k*}^* = 25$, $m_0 = 2$, $\pi_{k_{НН0}}^* = 2,5$

Изменение площади $F_{савд}$ оказывает на тягу двухвальных ТРДД и ТРД качественно такое же влияние, как и на тягу одновального ТРД: с увеличением $F_{савд}$ тяга уменьшается вследствие уменьшения степени повышения давления компрессора и, следовательно, удельной тяги.

Однако на двухвальных ТРД величина π_k^* снижается меньше, чем на одновальных, так как снижение $\pi_{квд}^*$ частично компенсируется увеличением $\pi_{кнд}^*$; соответственно меньше снижается тяга и увеличивается удельный расход топлива (сравни табл. 5.5 и 5.2).

Т а б л и ц а 5.5

$\pi_{кз0}^* = 12; \quad T_{г0}^* = 1600 \text{ К}$

Коэффициент влияния	$\bar{T}_{гр}^*$	$M\pi$		0			2,2		
		$\pi_{кнд}^*$	$\pi_{кнд0}^*$	2,4	3,47	4	2,4	3,47	4
δR	1			-0,5	-0,3	-0,05	-0,4	-0,4	0
$\delta F_{савд}$	0,9			-1,2	-1	-0,7	-0,8	-0,7	-0,6
	0,8			-1,8	-1,9	-1,8	-1,2	-1,1	-1,1
$\delta C_{уд}$	1,0			0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
$\delta F_{савд}$	0,9			0,5	0,5	0,5	0,15	0,15	0,15
	0,8			0,9	0,9	0,9	0,3	0,2	0,2

Этот вывод относится и к ТРДД, хотя имеет другое объяснение: снижение π_k^* в этом случае компенсируется увеличением степени двухконтурности.

Коэффициенты влияния площади соплового аппарата турбины ВД на тягу двухвального ТРД, как и коэффициенты влияния площади сопла $\delta R / \delta F_{свд}$, зависят от распределения работы между каскадами. С увеличением $\pi_{кнд0}^*$ при $\pi_{кз0}^* = const$ они уменьшаются (в отличие от коэффициентов $\delta R / \delta F_{свд}$, которые при этом увеличиваются), что объясняется снижением работы турбины ВД и уменьшением ее влияния на рабочий процесс двигателя (см. табл. 5.5 и 5.3).

Коэффициенты влияния площади $F_{савд}$ на тягу двухвального ТРДД значительно зависят от степени двухконтурности. С увеличением m_2 они увеличиваются (табл. 5.6), что объясняется увеличением $\pi_{квд}^*$ из условия оптимального распределения энергии

между контурами) и соответственно $\angle_{гвд}$, а следовательно, увеличением роли турбины ВД в рабочем процессе ТРДД.

Т а б л и ц а 5.6

Коэффициент влияния	M_p	0				2,2	
	$T_{гв}^*$, К	1600	1600	1600	1200	1600	1600
	$\pi_{кв}^*$	25	25	25	12	25	25
	$\frac{M_D}{T_{г.вр}^*}$	1	2	6	1	1	2
$\frac{\partial K}{\partial F_{савд}}$	1	-0,3	-0,7	-0,8	-0,5	-0,2	-0,6
	0,9	-0,4	-1,2	-1,4	-1	-0,4	-0,9
	0,8	-0,7	-1,6			-0,8	-1,2
$\frac{\partial C_{уд}}{\partial F_{савд}}$	1	-0,2	+0,1	-0,2	-0,2	0	0,2
	0,9	-0,3	+0,2	-0,3	-0,4	0,1	0,4
	0,8	-0,5	+1	-0,5	-0,7	0,2	0,7

5.3.3. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины НД

Изменение площади соплового аппарата турбины НД оказывает на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД и положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД двухвальных, а также многовальных ТРДД и ТРД, такое же влияние, как и площадь сопла на совместную работу узлов одновального ТРД (см. § 5.1): с увеличением $F_{савд}$ при $T_r^* = const$ величины $\pi_{гвд}^*$, $\pi_{квд}^*$, $n_{пр.ввд}$ и $\Delta K_{квд}$ повышаются.

С изменением площади $F_{савд}$ степень понижения давления в турбинах $\pi_{гвд}^*$ и $\pi_{гнд}^*$ изменяется противоположно; соответственно изменяется работа турбин $\psi_{гвд}$ и $\psi_{гнд}$, а следовательно, и работы компрессоров $\psi_{квд}$ и $\psi_{кнд}$, что ведет к изменению скольжения частот вращения роторов $n_{вд}/n_{нд}$. Например, с увеличением $F_{савд}$ при $T_r^* = const$ скольжение возрастает главным образом вследствие повышения частоты вращения ротора ВД, что сопровождается

смещением линии совместной работы на характеристике компрессора НД вниз и увеличением запасов $\Delta K_{унд}$.

Таким образом, главная особенность влияния площади $F_{са нд}$ заключается в том, что с ее изменением перераспределяется работа между турбокомпрессорами ВД и НД и повышаются (при увеличении $F_{са нд}$) запасы устойчивой работы обоих каскадов компрессора.

Изменение площади $F_{са нд}$, как и $F_{са вд}$ (и по той же причине) оказывает на запасы устойчивой работы компрессора НД ТРДД меньшее влияние, чем на компрессор двухвального ТРД (рис. 5.40).

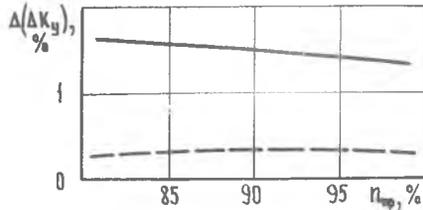
При изменении площади $F_{са нд}$ суммарная степень понижения давления в турбине не изменяется (с точностью до влияния КПД турбин), так как она определяется величинами $F_{са вд}$ и $F_{сткр}$, которые сохраняются постоянными.

Не изменяется, следовательно, и суммарная работа турбины, а также температура газа за турбиной.

Вследствие этого суммарная работа компрессора двухвального ТРД и температура за компрессором сохраняются неизменными. Если бы КПД компрессоров НД и ВД был одинаковым, то не изменилась бы и суммарная степень повышения давления $\pi_{к\sigma}^*$. В этом случае сохраняются неизменными все удельные параметры двигателя, расход воздуха и тяга.

В действительности КПД компрессоров НД и ВД обычно не одинаковы, кроме того, с увеличением $F_{са нд}$ рабочие точки на характеристиках компрессоров смещаются таким образом, что одновременно с увеличением запасов устойчивой работы, как правило, снижаются КПД компрессоров, особенно в зоне высоких $n_{пр}$. Это приводит к уменьшению $\pi_{к\sigma}^*$, а следовательно, и расхода воздуха через двигатель (что очевидно из условия $G_{пр,г} = const$ при $T_r^* = const$). Соответственно уменьшаются степень расширения сопла π_c^* , удельная и полная тяга и увеличивается удельный расход топлива.

Поскольку особенности влияния площади $F_{са нд}$ на основные данные двигателя определяются изменением КПД $\eta_{унд}^*$ и $\eta_{вд}^*$, коэффициенты влияния $\sigma_{R10\%}$ зависят от характеристик компрес-



Р и с. 5.40. Изменение запасов устойчивой работы компрессора НД $\Delta(\Delta K_u) = \Delta K_u - \Delta K_{уек}$ при увеличении площади $F_{са нд}$ на 1% (см. обозначения и параметры на рис. 5.39)

соров, в том числе, от распределения работы между каскадами (табл. 5.7) и, в особенности, от выбора положения исходных расчетных точек на характеристиках компрессоров.

Т а б л и ц а 5.7

$$\pi_{\kappa\Sigma_0}^* = 12 ; \quad T_{\text{ср}}^* = 1600^{\circ} \text{ К}$$

Коеф- фици- ент ВЛИЯН.	M_{Π}	0			2,2		
		$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$	$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$	$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$	$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$	$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$	$\frac{\pi_{\kappa\text{нд}}^*}{T_{\text{ср}}^*}$
σ_R	I	-0,75	-1,25	-1,5	-1	-1,3	-1,5
$\sigma_{F_{\text{с.нд}}}$	0,9	-0,8	-1,3	-1,4	-0,9	-1,3	-1,3
	0,8	0	-0,6	-0,6	-0,1	-0,4	-0,35
$\sigma_{T_{\text{ср}}}$	I	0,2	0,3	0,4		0,05	0,05
$\sigma_{F_{\text{с.нд}}}$	0,9	0,2	0,3	0,4	-0,1	0,05	-0,05
	0,8	-0,2	0,15	0,15	-0,1	0,05	-0,05

Особенность ТРДД заключается в том, что с увеличением $F_{\text{с.нд}}$ снижается степень двухконтурности, это накладывает свой отпечаток на изменение тяги и удельного расхода топлива (рис. 5.4I). В результате тяга ТРДД снижается с увеличением $F_{\text{с.нд}}$ меньше, чем ТРД.

Влияние изменения площадей характерных сечений на характеристики двухвалных ТРДД и ТРД рассматривалось при постоянной температуре газа перед турбиной. В §5.1 показано, что оно зависит от закона регулирования. Еще в большей степени это относится к многовальным двигателям. Поскольку при $T_r^* = \text{const}$ изменение определенной площади по-разному влияет на изменение частот вращения роторов ВД и НД (во многих случаях они изменяются противоположно, например, при изменении $F_{\text{с.нд}}$), при регулировании двигателей по закону $n_{\text{ВД}} = \text{const}$ или $n_{\text{НД}} = \text{const}$ изменение этой площади приводит к существенно различному изменению тяги. Например, увеличение $F_{\text{с.нд}}$ при $T_r^* = \text{const}$ ведет к увеличению $n_{\text{ВД}}$ и снижению $n_{\text{НД}}$ при незначительном изменении тяги (см. рис. 5.4I). Увеличение этой площади при $n_{\text{ВД}} = \text{const}$ приводит к значительному снижению температуры T_r^* и соответствующему уменьшению тяги, а при $n_{\text{НД}} = \text{const}$, наоборот, температура T_r^* и тяга увеличиваются.

Р и с. 5.41. Обобщенные характеристики двухвального ТРДД с $F_{сана} = va\gamma$ при $M_n=0$ ($T_{гв}^* = 1600$ К, $\lambda_{квд} = 25$, $m_0 = 2$, $\lambda_{кнд} = 2,5$):

— $F_{сана} = 0,123$ м²;

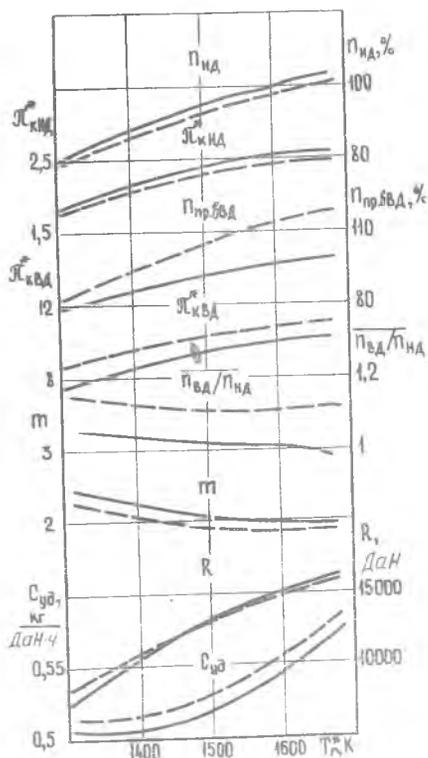
--- $\delta F_{сана} = +10\%$.

5.3.4. Особенности влияния площадей характерных сечений и управления компрессором на совместную работу узлов многовальных ТРДД и ТРД

В учебном пособии [16] показано, что турбокомпрессор ВД многовальных ТРДД и ТРД в газодинамическом отношении представляет собой одновальный ТРД, у которого роль сопла играет сопловый аппарат расположенной за ним турбины. Поэтому закономерности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов одновального турбокомпрессора (ТРД), рассмотренные в § 5.1 и 5.2, справедливы и для турбокомпрессора ВД. Изменение $F_{с.авд}$ и площади соплового аппарата турбины, расположенной за турбиной ВД, оказывает на совместную работу узлов этого турбокомпрессора и положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД такое же влияние, как и площади $F_{с.а}$, $F_{с.кр}$ на закономерности совместной работы узлов одновального ТРД.

Изменение других площадей характерных сечений турбины и сопла практически не влияет на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД.

Любой турбокомпрессор СД трехвальных (или турбокомпрессор ПД многовальных) ТРДД и ТРД в газодинамическом отношении представля-



ет собой турбокомпрессор НД двухвального ТРД. Поэтому закономерности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов турбокомпрессора НД двухвального ТРД, рассмотренные в разделах 5.3.1 - 5.3.3, справедливы и для указанных турбокомпрессоров.

На совместную работу турбокомпрессора СД в системе трехвального двигателя оказывает влияние изменение площадей сопловых аппаратов: $F_{с.асд}$, $F_{с.анд}$ и $F_{с.авд}$. С изменением отношения $F_{с.анд}/F_{с.асд}$ изменяется степень понижения давления $\pi_{т.сд}^*$, работа турбины $L_{т.сд}$ и частота вращения ротора СД. Изменение площади $F_{с.авд}$ ведет к изменению величин $\pi_{т.вд}^*$, $L_{т.вд}$ и $N_{вд}$. В обоих случаях изменяется скольжение частот вращения роторов $N_{вд}/n_{сд}$, что сопровождается изменением сопротивления за компрессором СД и ведет к смещению линии совместной работы на его характеристике.

Все это справедливо для случая влияния соответствующих трех сопловых аппаратов на совместную работу узлов любого турбокомпрессора ПД в системе многовальных ТРДД. Изменение других площадей характерных сечений турбины и сопла практически не оказывает влияния на работу указанного турбокомпрессора ПД.

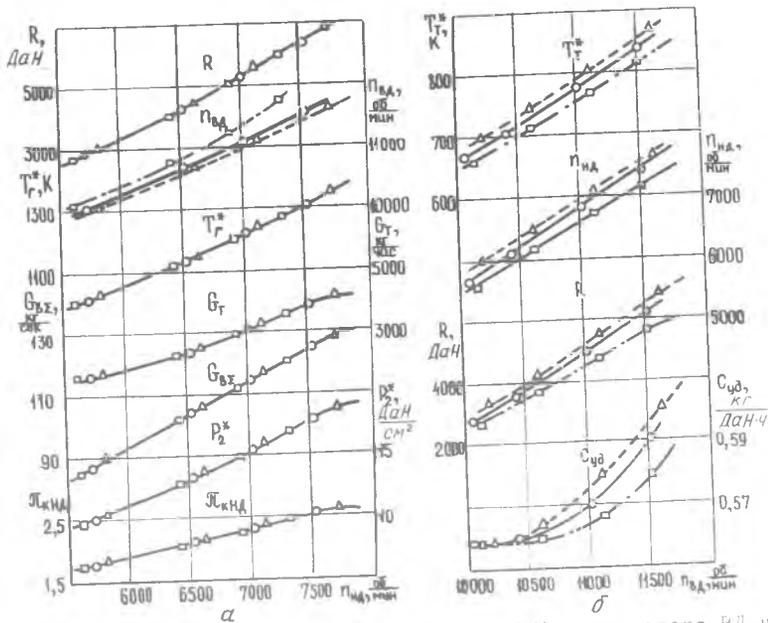
В соответствии с изложенным в системе, например, трехвального ТРДД и ТРД изменение площадей сопловых аппаратов $F_{с.авд}$, $F_{с.асд}$ или $F_{с.анд}$ оказывает на закономерности совместной работы узлов турбокомпрессора СД такое же влияние, как и соответственно площади $F_{с.авд}$, $F_{с.анд}$ и $F_{с.кр}$ на закономерности совместной работы узлов турбокомпрессора НД двухвального ТРД.

Наконец, закономерности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов турбокомпрессора НД двухвального ТРДД, рассмотренные в разделах 5.3.1 - 5.3.3, справедливы и для турбокомпрессора НД многовальных ТРДД. Например, изменение площадей $F_{с.асд}$, $F_{с.анд}$, $F_{с.кр}$ и $F_{с.дкр}$ трехвального ТРДД оказывает на совместную работу узлов турбокомпрессора НД качественно такое же влияние как и площади $F_{с.авд}$, $F_{с.анд}$, $F_{с.кр}$ и $F_{с.дкр}$ на совместную работу узлов этого же турбокомпрессора в системе двухвального ТРДД. Однако количественно влияние площадей $F_{с.авд}$ и $F_{с.асд}$ на $\Delta K_{унд}$ в системе соответственно двухвального и трехвального ТРДД неодинаково. Так, увеличение этих площадей ведет к снижению соответственно степеней понижения давления $\pi_{т.вд}^*$ и $\pi_{т.сд}^*$ и величин $L_{т.вд}$ и $L_{т.сд}$. Причем величина $L_{т.сд}$ в системе трехвального ТРДД снижается значительно вследствие дополни-

тельного снижения температуры газа перед турбиной СД при $T_r^* = const$, поэтому неодинаково изменяется скольжение роторов, а следовательно, и запасы $\Delta K_{уд}$ рассматриваемых двигателей.

Изменение площади $F_{савд}$ практически не влияет на закономерности совместной работы узлов турбокомпрессора НД трехвального ТРДД.

Управление каким-либо каскадом компрессора оказывает на совместную работу узлов и характеристики многовального ТРДД аналогичное влияние, как и в системе одновального ТРД. Например, на рис. 5.42, а показаны экспериментальные материалы, отражающие влияние поворота лопаток входного аппарата (ВНА) первой



Р и с. 5.42. Влияние поворота лопаток ВНА компрессора ВД на характеристики двухвального ТРДД при $n_{нд} = const(\alpha)$ и $T_{вд} = const$ (б) ($T_{г0}^* = 1340$ К, $\pi_{квс0}^* = 19$, $\eta = 1$, $\pi_{кнд0}^* = 2,6$):
 Δ - ВНА + 5°; \circ - ВНА - 0°; \square - ВНА - 7°

ступени компрессора ВД на характеристики двухвального ТРДД, построенные по частоте вращения ротора НД. Поворот лопаток сопровождается соответствующим изменением частоты вращения ротора ВД, другие параметры двигателя сохраняются неизменными, так как в рассматриваемом диапазоне изменения углов установки лопаток ВНА КПД компрессора практически не изменяется. В частности, поворот лопаток на -5° (прикрытие ВНА), обеспечивающий увеличение запасов устойчивой работы $\Delta k_{y_{вд}}$ при низких $n_{пр. в в д}$, сопровождается повышением частоты вращения ротора ВД.

Такое же изменение углов установки лопаток при условии $n_{вд} = const$ приводит к существенному снижению тяги (рис. 5.42, б), более значительному по сравнению со снижением тяги одновального ТРД.

Более значительное изменение углов установки лопаток сопровождается, кроме того, изменением КПД компрессора. Влияние КПД на характеристики многовального ТРДД рассмотрено в гл. 4.

Регулирование направляющих лопаток входных ступеней других каскадов компрессора в системе многовального ТРДД приводит к соответствующему изменению частот вращения роторов их турбокомпрессоров и к аналогичному изменению характеристик двигателя.

§ 5.4. Особенности расчета характеристик ТРДД и ТРД с регулируемыми площадями характерных сечений

В § 3.2 [15] подчеркивалось, что в настоящее время существуют различные методики расчета характеристик турбореактивных двигателей и объяснены причины, которые обусловили такое разнообразие. С еще большим основанием это относится к методикам расчета характеристик двигателей с регулируемыми площадями проходных сечений (особенно двигателей сложных схем), так как последовательность расчета зависит не только от схемы и типа двигателя, но и в значительной степени еще от того, какими параметрами задается режим (см. [32], с. 379 и [8]).

Рассмотрим методики, разработанные для наиболее характерных схем двигателей и регулируемых площадей, а также для наиболее интересных сочетаний параметров, определяющих режим.

Методики расчета, приведенные в § 5.4, не претендуют на универсальность, поскольку при их составлении исходили, главным образом, из условия уменьшения трудоемкости расчета. Это по сущест-

ву оптимальный путь совместного решения основных уравнений и характеристик узлов при заданных исходных данных.

Заданными для расчета, как и для двигателя с нерегулируемыми сечениями (см. § 4.2 [16] и § 3.2 [15]) являются: внешние условия (T_H , P_H и M_H), а следовательно, температура T_c^* и при заданном коэффициенте $\sigma_{\delta x}$ - давление P_B^* ; результаты расчета исходной точки, на основе которых вычисляются площади характерных сечений; характеристики узлов и коэффициенты потерь (в зависимости от того, как заданы потери, расчет может быть приближенным, см. раздел 3.2.1, или более точным, раздел 3.2.2 [15]) и режим работы, который определяется числом параметров, равным числу регулирующих факторов.

5.4.1. Особенности расчета характеристик одновального ТРД с регулируемыми площадями характерных сечений

Одновальный ТРД с регулируемым соплом - имеет два регулирующих фактора, режим его работы определяется двумя параметрами, при расчете характеристик необходимо задаваться двумя независимыми переменными.

В рассматриваемом случае режим задается, как правило, величинами температуры T_c^* и частоты вращения n , приведенные значения которых однозначно определяют положение рабочей точки на характеристике компрессора. Поэтому целесообразно предварительно линии $T_{c,лр}^* = const$ нанести на характеристику компрессора, как указано в разделе 1.3.3 [15].

Характеристики одновального ТРД могут быть рассчитаны в следующей последовательности.

1. По формулам приведения вычисляют приведенные параметры $T_{c,лр}^*$ и $n_{лр}$, наносят рабочую точку на характеристику компрессора и определяют в этой точке величины π_c^* , $q(\lambda_B)$ и η_c^* .

2. Далее определяют параметры компрессора, камеры сгорания, турбины и сопла, а также тягу и удельный расход топлива, как указано в § 3.2 [15] (см. первый вариант расчета). Расчет отличается только тем, что подбирать положение рабочей точки на характеристике компрессора из условия $F_{c,кп} = const$ не требуется. Оно обеспе-

чивается при регулировании двигателя поддержанием вычисленного значения площади сопла.

Методика расчета не изменится, если режим задается двумя другими параметрами, например, величинами ΔK_y и n_{np} , по которым легко найти положение рабочей точки на характеристике компрессора.

Если режим задается величинами T_r^* и $F_{с.кр}$, то расчет не отличается от методики, изложенной в § 3.2 (см. первый вариант).

Одновальный ТРД с регулируемыми площадями сопла и соплового аппарата — имеет три регулирующих фактора, режим его работы целесообразно задавать положением рабочей точки на характеристике компрессора (π_k^* , n_{np}) и температурой газа перед турбиной. Последовательность расчета характеристик двигателя не отличается в этом случае от последовательности термогазодинамического расчета. В результате определяются удельные параметры, основные данные и потребные значения площадей $F_{с.кр}$ и $F_{с.а}$, которые необходимо поддержать для обеспечения заданного положения рабочей точки на характеристике компрессора и температуры T_c^* .

5.4.2. Особенности расчета характеристик многовальных ТРДД (ТРД) с $F_{с.кр} = vaZ$

При расчете характеристик многовальных с регулируемой площадью сопла ТРДД и ТРД, как и одновального ТРД с $F_{с.кр} = vaZ$, можно задаваться двумя независимыми переменными. Следует, однако, помнить, что в системе многовальных двигателей изменение площади сопла практически не оказывает влияние на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД, положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД и параметры этого турбокомпрессора. Турбокомпрессор ВД ведет себя как одновальный ТРД с нерегулируемыми сечениями (с одним регулиющим фактором). Поэтому только один его параметр можно принимать в качестве параметра регулирования, т.е. независимого переменного, например, T_r^* , или $n_{ВД}$, или $\pi_{к.ВД}$. В качестве другого независимого переменного следует принимать параметр, который изменяется при изменении площади сопла, например, частоту вращения ротора низкого давления $n_{нд}$.

Расчет характеристик многовального ТРДД с $F_{сткр} = \nu a z$, у которого режим задан величинами $T_{г}^*$ и $\Pi_{нд}$, представляет известные затруднения, так как положение рабочих точек на характеристиках компрессоров должно определяться путем подбора.

Для облегчения расчета целесообразно на характеристику компрессора ВД нанести линию совместной работы и построить параметры этого турбокомпрессора в зависимости от $T_{гпр.ввд}^*$ (см. раздел 4.2.1 [16]):

$$\Pi_{квд}^*, q(\lambda_{ввд}), \Pi_{пр.ввд}, T_{кпр.ввд}^*, T_{гнд пр.ввд}^* = f(T_{г.пл.ввд}^*).$$

Далее при расчете характеристик двухвального ТРДД (схему см. на рис. 4.16 [16]) последовательно определяют:

1) приведенную частоту вращения $\Pi_{нд пр}$ по величинам $\Pi_{нд}$ и $T_{н}^*$, и при полученном значении $\Pi_{нд пр} = const$ задаются в первом приближении рабочей точкой на характеристике компрессора НД, т.е. величиной $\Pi_{кнд}^*$;

2) работу компрессора $L_{кнд}$ и температуру за компрессором НД $T_{бвд}^*$;

3) температуру газа перед турбиной $T_{гпр.ввд}^*$, приведенную к САУ по температуре воздуха на входе в компрессор ВД. В зависимости от этой температуры по предварительно рассчитанному графику находят параметры турбокомпрессора ВД, в том числе, относительную плотность тока $q(\lambda_{ввд})$;

4) полную температуру рабочего тела за компрессором и за турбиной ВД по формулам приведения;

5) относительный расход топлива через камеру сгорания;

6) степень двухконтурности по уравнению (4.11);

7) относительную плотность тока $q(\lambda_{ввд})$ по уравнению неразрывности (4.12), записанному для сечений (в), (сПкр), (ввд). Если полученная величина отличается от величины $q(\lambda_{ввд})(п.3)$, то задаются другим положением рабочей точки на характеристике компрессора НД, т.е. другой величиной $\Pi_{кнд}^*$, и расчет повторяют;

8) работу турбины $L_{гнд}$ из уравнения мощности (4.7), а из формулы для работы турбины - значение $\Pi_{гнд}^*$;

9) параметры на выходе из сопел наружного и внутреннего контуров, потребную площадь сопла, $F_{с\text{ткр}}$, а также тягу и удельный расход топлива.

Методика расчета характеристик трехвального (многовального) ТРДД не будет отличаться от изложенной методики расчета характеристик двухвального ТРДД, если предварительно линии совместной работы нанести на характеристики компрессоров ВД и СД и построить параметры этих турбокомпрессоров в зависимости от $T_{г\text{првса}}^*$.

Расчет характеристик двухвального ТРД несколько облегчается, так как при этом не требуется определять степень двухконтурности и параметры в наружном контуре.

Расчет характеристик ТРДД с регулируемой площадью сопла наружного контура выполняется аналогично, следует только иметь в виду, что изменение $F_{с\text{дкр}}$ оказывает наиболее значительное влияние на степень повышения давления $\pi_{кнд}^*$ и производится обычно с целью поддержания определенного положения линии совместной работы на характеристике компрессора НД. Расчет характеристик ТРДД, у которого площадь $F_{с\text{вкр}}$ регулируется из условия обеспечения заданного $\Delta K_{унд}$, отличается тем, что подбирать величину $\pi_{кнд}^*$ не требуется, вместо этого методом последовательных приближений подбирается частота вращения $n_{нд}$ из условия обеспечения постоянной площади сопла внутреннего контура.

ТРДД с регулируемыми площадями обоих контуров - имеет три регулирующих фактора, режим его работы может задаваться величинами T_r^* , $n_{нд}$ и $\Delta K_{унд}$. Расчет характеристик в этом случае упрощается так как в результате определяются необходимые значения площадей $F_{с\text{ткр}}$ и $F_{с\text{дкр}}$, которые обеспечивают заданные значения частоты вращения $n_{нд}$ и запаса устойчивой работы $\Delta K_{унд}$.

5.4.3. Особенности расчета характеристик многовальных ТРДД (ТРД) с $F_{с\text{авд}} = \text{ваг}$ и $F_{с\text{анд}} = \text{ваг}$, а также с регулируемыми площадями других сечений

Регулирование площади соплового аппарата турбины ВД оказывает непосредственное влияние на параметры турбокомпрессора ВД и особенно на степень повышения давления $\pi_{с\text{авд}}^*$. Поэтому при расчете характеристик двигателя с $F_{с\text{авд}} = \text{ваг}$ необходимо задаться двумя параметрами, характеризующими работу турбокомпрессора ВД.

Например, могут быть заданы положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД $\Delta K_{уд} = f(\eta_{пр,ВД})$ и температура T_c^* , характеризующая режим. При расчете необходимо подбирать площадь $F_{савд}$ и положение обеих рабочих точек на характеристиках компрессоров. Задача в любом случае решается подбором. В первом приближении можно задаться величиной $F_{савд}$ и подобрать положение рабочих точек на характеристиках компрессоров по методике, изложенной в разделе 4.2.2 [16]. Если рабочая точка на характеристике компрессора ВД оказывается не на заданной линии совместной работы, то расчет повторяют, принимая другое значение площади $F_{савд}$.

Количество последовательных приближений уменьшается и расчет характеристик несколько упрощается, если, как и в разделе 5.4.2, предварительно рассчитать зависимость параметров турбокомпрессора ВД от температуры $T_{ср,ВД}^*$.

Эта зависимость может рассчитываться в следующей последовательности: берут рабочую точку на заданной линии совместной работы на характеристике компрессора ВД и, кроме того, принимают в первом приближении величину $F_{савд}$; вычисляют коэффициент A и температуру $T_{ср,ВД}^*$ соответственно по формулам (4.2) и (4.1), а по формуле (4.4) определяют величину $\rho_{т,ВД}$ и, следовательно, степень понижения давления $\pi_{т,ВД}^*$. Подставляя полученное значение $\pi_{т,ВД}^*$ в уравнение (1.7), определяют $\sigma_{пр,г}$ и $F_{савд}$. Если полученное значение $F_{савд}$ не равно принятому, то расчет повторяют, добиваясь сходимости этих величин.

Расчет зависимости параметров турбокомпрессора ВД от $T_{ср,ВД}^*$ несколько облегчается, если положение линий совместной работы на характеристике компрессора ВД задано законом изменения площади соплового аппарата, например, зависимостью $F_{савд} = f(\eta_{пр,ВД})$. В этом случае нужно задаться величинами $\eta_{пр,ВД}$, найти соответствующие $F_{савд}$ и $\sigma_{пр,г}$, а по уравнению (1.7) определить $\pi_{т,ВД}^*$. Затем вычисляется константа „С“ и на основании уравнения (4.5) легко находятся рабочие точки на характеристике компрессора при принятых $\eta_{пр,ВД}$. Температура $T_{ср,ВД}^*$ в этих точках рассчитывается по уравнению неразрывности (4.1).

Далее расчет характеристик двухвального ТРД с $F_{савд} = \nu \Delta z$ при заданном T_c^* и имеющихся зависимостях параметров турбокомпрессора ВД от $T_{ср,ВД}^*$ сводится к подбору рабочих точек на характеристике компрессора НД и к последующему определению основ-

ных данных. Поскольку ни $\pi_{кнд}^*$, ни $n_{нд}$ на двигателе с нерегулируемыми площадями сопел в рассматриваемом случае заданными быть не могут, необходимо величину $\pi_{кнд}^*$ подобрать из условия соблюдения неразрывности потока между сечениями (в), (ОЦкр) и (ВД), а частоту вращения $n_{нд}$ подобрать из условия обеспечения баланса мощности компрессора и турбины НД и, кроме того, неразрывности потока между сечениями (в), (ОЦкр) и (ОЦкр) (см. раздел 5.4.2).

ТРДД с $F_{савд} = v\alpha z$ и, кроме того, с регулируемыми площадями сопел $F_{скр}$ и $F_{слкр}$ имеет четыре регулирующих фактора. Режим его работы задается четырьмя параметрами, например, величинами T_r^* , $\Delta K_{увд}$, $n_{нд}$ и $\Delta K_{унд}$. В этом случае при расчете задаются величинами $\pi_{кнд}^*$ и $n_{нд}$ и вычисляются в конце расчета требуемые значения площадей, как указано в разделе 5.4.2.

На ТРДД с регулируемой площадью соплового аппарата турбины НД изменение площади $F_{санд}$ оказывает значительное влияние как на параметры турбокомпрессора ВД, так и на параметры турбокомпрессора НД. Поэтому в качестве параметра, определяющего режим, кроме температуры T_r^* , можно брать любой параметр турбокомпрессоров ВД или НД.

Если на двухвальном ТРДД с $F_{санд} = v\alpha z$ режим задается величинами T_r^* и $n_{нд}$ (или $n_{вд}$), то в процессе расчета характеристик, как и в случае регулирования площади $F_{савд}$, необходимо подобрать положение обеих рабочих точек на характеристиках компрессоров и определить требуемое значение $F_{санд}$. Для этого можно воспользоваться обычной методикой, изложенной в разделе 4.2.2 [16], обеспечивая заданную частоту вращения $n_{нд}$ ($n_{вд}$) подбором за счет изменения $F_{санд}$.

Этот подход можно использовать во многих других случаях при различных регулирующих факторах и разных параметрах, определяющих режим, но такой метод весьма трудоемок.

Если законом (программой) регулирования задано изменение площади $F_{санд}$ в зависимости от какого-либо приведенного параметра, например, от $T_{рпрвд}^*$, то для облегчения расчета можно построить зависимость параметров турбокомпрессора ВД от $T_{рпрвд}^*$ (5.4.2). Методика этого расчета практически не отличается от методики расчета при регулировании $F_{савд}$.

Если на двухвальном ТРДД все площади характерных сечений турбины и сопла ($F_{савд}$, $F_{санд}$, $F_{скр}$ и $F_{слкр}$) — регулируемые, то режим задается пятью параметрами: положением рабочих точек на

характеристиках компрессоров, т.е. параметрами $\pi_{кнд}^*$, $q(\lambda_B)$, $\pi_{квд}^*$, $q(\lambda_{БВД})$, которые определяют и степень двухконтурности, и температурой газа перед турбиной. Методика расчета характеристик такого двигателя не отличается от методики его термогазодинамического расчета.

Изложенные в разделах 5.4.2 и 5.4.3 методики можно использовать для расчета характеристик многовальных ТРДД, а также двухвальных ТРД.

При расчетах на ЭВМ предлагаемые методики не всегда удобны, так как они не однотипны, и поэтому необходимо каждый раз составлять новую программу. Предпочтительнее универсальная методика, по которой могут быть рассчитаны на ЭВМ характеристики двигателей различных типов и схем [41].

В ы в о д ы

I. Изменение площади минимального сечения выходного сопла оказывает значительное влияние на запасы устойчивой работы и характеристики одновального ТРД. Закономерности и величина этого влияния зависят от условий при которых происходит изменение $F_{с.кр}$ ($T_r^* = const$, $n = const$ или $R = const$), числа M_n , параметров рабочего процесса в исходной точке (T_{r0}^* , $\pi_{к0}^*$), а также от режима. С увеличением $F_{с.кр}$ при $T_r^* = const$ запасы ΔK_y повышаются, а тяга увеличивается, и тем значительнее, чем выше T_{r0}^* , больше число M_n , меньше $T_{r.пр}^*$. Пониженной тяге крейсерского режима в данных условиях полета соответствует оптимальная площадь, при которой обеспечивается минимальный удельный расход топлива.

2. Одновальный ТРД с $F_{с.кр} = var$ является более гибким объектом регулирования по сравнению с двигателем с неизменяемыми сечениями. Режим его работы задается и поддерживается двумя регуляторами путем независимого изменения двух параметров. Обеспечивая определенный закон изменения $F_{с.кр}$ по $n_{пр}$, на таком двигателе может быть реализовано произвольно выбранное положение линии совместной работы на характеристике компрессора или выбранная закономерность изменения соотношения характеризующих режим основных параметров $n_{пр} = \frac{n}{\sqrt{T_r^*}} \sqrt{288}$ по $n_{пр}$.

3. Характер влияния площади соплового аппарата на запасы устойчивой работы и характеристики одновального ТРД зависит от тех же факторов, от которых зависит коэффициент влияния площади $F_{ска}$. Изменение параметров рабочего процесса $T_{г0}^*$ и $\pi_{к0}^*$ приводит к изменению этого влияния не только по величине, но и по знаку. С увеличением $F_{ска}$ при $T_{г0}^* = const$ на двигателе с обычно встречающимися величинами $T_{г0}^*$ и $\pi_{к0}^*$ запасы $\Delta \lambda_{у}$ повышаются, удельные параметры ухудшаются, тяга уменьшается.

4. На одновальном ТРД с $F_{ска} = var$ и $F_{ска} = var$ положение линии совместной работы на характеристике компрессора и закономерность изменения $n_{нпр} = f(n_{нв})$ вдоль этой линии могут быть приняты произвольно (т.е. в заданных условиях полета может быть реализована любая рабочая точка на характеристике компрессора и, кроме того, в этой точке может быть принято потребное значение температуры $T_{г0}^*$); эти величины обеспечиваются соответствующим изменением площадей $F_{ска}$ и $F_{ска}$ в зависимости от величины $n_{пр}$. Закономерности и диапазон изменения площадей $F_{ска}$ и $F_{ска}$ определяются углом наклона линии совместной работы и величинами $\pi_{к0}^*$ и $T_{г0}^*$. Наличие трех регулирующих факторов ($\theta_r \cdot T_{г0}^*$, $F_{ска}$) позволяет обеспечить устойчивую работу компрессора в полном диапазоне летных условий и наиболее полно использовать возможности одновального ТРД на всех режимах: получить максимально возможную тягу на максимальном режиме и минимально-возможный удельный расход топлива на крейсерских режимах.

5. Поворот лопаток НА первых или первых и последних ступеней является одним из эффективных средств управления компрессором. Компрессор с высокой степенью повышения давления $\pi_{к0}^*$, имеющий минимальные запасы устойчивости при низких $n_{пр}$, необходимо регулировать на $\Delta \lambda_{у макс}$, а компрессор с умеренной $\pi_{к0}^*$, имеющий достаточно высокие $\Delta \lambda_{у}$ и предназначенный для больших сверхзвуковых скоростей полета целесообразно регулировать на $\Delta \lambda_{у макс}$. Перепуск воздуха из средних ступеней компрессора в атмосферу является действенным средством увеличения запасов устойчивой работы $\Delta \lambda_{у}$, но сопровождается значительным ухудшением характеристик двигателя. Для повышения эффективности двигателя более целесообразно перепускать воздух за турбину, т.е. переходить к схеме ТРД с смешением потоков.

6. Закономерности влияния площадей $F_{ска}$ и $F_{ска}$ на совместную работу узла и запасы устойчивой работы компрессора, уста-

новленные для одновального ТРД, справедливы и для турбокомпрессора ВД многовальных ТРДД и ТРД, у которых роль рассматриваемых площадей играют соответственно $F_{савд}$ и площадь соплового аппарата турбины, расположенной непосредственно за турбиной ВД. Влияние указанных площадей на запасы $\Delta K_{увд}$ количественно не отличается от влияния соответствующих площадей в системе одновального ТРД при $\pi_{квдо}^* = \pi_{кo,трд}^*$ и $T_{г.пр.вдо}^* = T_{гo,трд}^*$. Изменение других площадей характерных сечений турбины и сопла практически не влияет на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД.

7. Влияние площадей характерных сечений турбины и сопла на совместную работу узлов турбокомпрессоров НД и СД (ТРД), и соответственно на запасы $\Delta K_{унд}$, $\Delta K_{уд}$ ($\Delta K_{упд}$) в системе двухвальных и многовальных ТРДД и ТРД, качественно отличается от их влияния на $\Delta K_{увд}$. Это обусловлено изменением скольжения частот вращения роторов и изменением степени двухконтурности. Закономерности этого влияния, а также влияния указанных площадей на характеристики рассматриваемых двигателей определяются теми же факторами, как и на одновальном ТРД, и, кроме того, распределением работы между каскадами компрессора и величиной m_0 :

увеличение площадей $F_{савд}$ (на двигателе с обычно встречающимися значениями $T_{гo}^*$ и $\pi_{к.о}^*$) и $F_{с.кр}$ ведет к снижению $\Delta K_{унд}$, а не к увеличению запасов устойчивой работы компрессора, как на одновальном ТРД;

влияние площади сопла наружного контура на запасы $\Delta K_{унд}$ и на большинство других газодинамических параметров двигателя противоположно влиянию $F_{с.кр}$;

на ТРДД со смешением потоков наружного и внутреннего контуров увеличение $F_{с.кр}$ позволяет значительно увеличить частоту вращения ротора НД и соответственно расход воздуха через двигатель без снижения запасов $\Delta K_{унд}$, и даже при их увеличении;

с увеличением $F_{санд}$ запасы $\Delta K_{унд}$, как и $\Delta K_{увд}$, увеличиваются;

с увеличением степени двухконтурности m_0 влияние площадей $F_{с.кр}$, $F_{савд}$ и $F_{санд}$ на $\Delta K_{унд}$ ослабевает;

удельные параметры и тяга многовальных ТРДД и ТРД при изменении $F_{с.кр}$ ($T_{г}^* = const$) изменяются качественно так же, как и параметры одновального ТРД. С увеличением $\pi_{кндo}^*$ ТРД при $\pi_{ккo}^* = const$ коэффициент влияния $\partial R / \partial F_{с.кр}$ возрастает, с увеличением m_0 ТРДД-снижается;

изменение $F_{савд}$ оказывает на тягу многовальных ТРДД и ТРД качественно такое же влияние, как и на тягу одновального ТРД, количественно это влияние меньше, так как с увеличением $F_{савд}$ снижение $\pi_{свд}^*$ на ТРД компенсируется увеличением $\pi_{кнд}^*$, а на ТРДД увеличением m . С увеличением $\pi_{квд}^*$ при $\pi_{к\sigma}^* = const$ (в том числе, вследствие увеличения m_0 ТРДД) коэффициенты влияния $\partial R / \partial F_{савд}$ возрастают, так как повышается работа $L_{гвд0}$ и увеличивается влияние ее изменения на параметры двигателя;

влияние площади $F_{санд}$ на тягу и удельный расход топлива при $T_c^* = const$ определяется изменением КПД каскадов компрессора вследствие смещения на характеристике компрессора линий совместной работы.

8. Влияние площадей $F_{савд}$, $F_{санд}$ и $F_{скр}$ на закономерности совместной работы узлов турбокомпрессора НД и запасы $\Delta K_{унд}$, определенное для двухвального ТРД, справедливо и для турбокомпрессора СД (ПД) трехвальных (многовальных) ТРДД и ТРД, у которых роль указанных площадей играют соответственно $F_{савд}$, $F_{санд}$ и $F_{скр}$. Влияние указанных площадей на запасы $\Delta K_{унд}$ количественно не отличается от влияния соответствующих площадей на $\Delta K_{унд}$ в системе двухвального ТРД, если $\pi_{квд0}^* = \pi_{квд0}^*_{ТРД}$, $\pi_{к\sigma0}^* = \pi_{к\sigma0}^*_{ТРД}$ и $T_{срвсд}^* = T_{срвсд}^*_{ТРД}$. Изменение площадей сопел $F_{скр}$ и $F_{скр}$ практически не влияет на совместную работу узлов турбокомпрессора СД трехвального ТРДД.

9. Закономерности влияния площадей характерных сечений турбины и сопла на совместную работу узлов турбокомпрессора НД и запасы $\Delta K_{унд}$, установленные для двухвальных ТРДД, в большинстве случаев сохраняются и для турбокомпрессора НД трехвальных (многовальных) ТРДД.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Какое влияние оказывает изменение площади сопла на совместную работу узлов, положение линии совместной работы и обобщенные характеристики одновального ТРД, построенные по температуре $T_{г.пр}^*$?

2. Объясните физический процесс влияния площади сопла одновального ТРД на величины ΔK_y , R и C_{y0} при следующих условиях:

а) $n = const$; б) $T_c^* = const$.

3. От каких факторов и как зависят коэффициенты влияния $\partial R / \partial F_{c,kr}$ и $\partial C_{y\theta} / \partial F_{c,kr}$ одновального ТРД?

4. Каким образом обеспечить на одновальном ТРД с $F_{c,kr} = var$:
а) заданное расположение линии совместной работы на характеристике компрессора; б) заданную закономерность изменения $n_{np,r} = f(T_{c,kr}^*)$?
Как характер и потребный диапазон изменения площади $F_{c,kr} = f(n_{np,r})$ зависят: а) от угла наклона линии совместной работы на характеристике компрессора; б) от угла наклона кривой $n_{np,r} = f(n_{np,r})$?

5. Чем скоростные характеристики и протекание линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД, регулируемого по закону $T_r^* = const$, $n = const$, отличаются от скоростных характеристик и протекания линии совместной работы на характеристике компрессора того же ТРД, регулируемого по законам:
а) $n = const$ ($F_{c,kr} = const$), б) $T_r^* = const$ ($F_{c,kr} = const$) ?

6. Каковы закономерности изменения площади $F_{c,kr} = f(T_{c,kr}^*)$ для $\pi_{k_0}^* = var$ при $n_{np,r} = const$? Как потребный диапазон изменения $F_{c,kr}$ зависит от $T_{c,kr}^*$?

7. Чем скоростные характеристики одновального ТРД, регулируемого по закону $T_r^* = const$, $n_{np} = const$, отличаются от характеристик ТРД, регулируемого по закону $T_r^* = const$, $n = const$ при следующих условиях сравнения:

а) при одинаковых параметрах цикла и одинаковой тяге на взлетном режиме; б) при одинаковых параметрах цикла и одинаковой тяге на максимальном числе M_n ?

8. Как изменить угол наклона кривой $n = f(T_H^*)$ одновального ТРД с $F_{c,kr} = var$ на максимальном режиме при условии $T_r^* = const$, чтобы тяга по числу M_n увеличивалась более интенсивно? Каким образом при этом изменяется положение линии совместной работы и функция $F_{c,kr} = f(T_H^*)$?

9. Как следует изменить закон регулирования площади $F_{c,kr} = f(T_H^*)$ на максимальном режиме одновального ТРД ($\pi_{k_0} = 12$) при условии $\Delta K_y = const$, чтобы увеличить угол наклона кривой $R = f(V_n)$? Каким образом при этом изменяются функции $T_r^* = f(T_H^*)$ и $n = f(T_H^*)$, положение рабочей точки на характеристике компрессора?

10. Как выбирается программа регулирования ТРД с $F_{c,kr} = var$ на режимах пониженной тяги? Какие существуют способы снижения тяги и как они влияют на удельный расход топлива?

11. Каковы закономерности изменения $F_{c,kr} = f(\alpha_{py\theta})$ при регулировании одновального ТРД на режимах пониженной тяги по следующим программам: а) $T_r^* = const$, $n = f(\alpha_{py\theta})$; б) $n = const$, $T_r^* = f(\alpha_{py\theta})$? 73

12. Объясните особенности влияния площади $F_{c.a}$ на положение линии совместной работы и характеристики одновального ТРД.

13. Каким образом должны регулироваться площади сечения $F_{c.kp}$ и $F_{c.a}$ одновального ТРД при условии неизменного положения рабочей точки на характеристике компрессора?

14. Чем дроссельные характеристики одновального ТРД с $F_{c.kp} = \text{var}$, $F_{c.a} = \text{var}$ отличаются от дроссельной характеристики одновального ТРД с $F_{c.kp} = \text{var}$?

15. Каковы особенности и структурные схемы регулирования одновальных ТРД: а) с $F_{c.kp} = \text{var}$; б) с $F_{c.kp} = \text{var}$, $F_{c.a} = \text{var}$?

16. Каковы преимущества одновального ТРД с $F_{c.kp} = \text{var}$ перед ТРД с нерегулируемыми сечениями? Каковы недостатки этого двигателя по сравнению с двигателем с тремя регулирующими факторами ($F_{c.kp} = \text{var}$, $F_{c.a} = \text{var}$)?

17. Какое влияние на положение линии совместной работы, запасы устойчивости ΔK_y и характеристики одновального ТРД с $F_{c.kp} = \text{const}$ оказывает поворот лопаток НА первых (последних) ступеней компрессора в зоне низких n_{np} при: а) $T_r^* = \text{const}$, б) $n = \text{const}$?

18. Какое влияние на положение линии совместной работы, запасы устойчивости ΔK_y и характеристики ТРД с $F_{c.kp} = \text{var}$, регулируемого по закону $T_r^* = \text{const}$, $n = \text{const}$, оказывает поворот лопаток НА первых (последних) ступеней компрессора в зоне низких n_{np} ?

19. Какое влияние на положение линии совместной работы, запасы устойчивости ΔK_y и характеристики одновального ТРД при $n = \text{const}$ оказывает перепуск воздуха из средних ступеней компрессора в атмосферу (в зоне низких n_{np})?

20. Объясните процесс влияния площади сопла $F_{cI.kp}$ на совместную работу узлов и на характеристики двухвальных (многовальных) ТРДД и ТРД при $T_r^* = \text{const}$.

21. Особенности влияния площади сопла наружного контура $F_{cII.kp}$ на совместную работу узлов и на характеристики двухвального (многовального) ТРДД при $T_r^* = \text{const}$.

22. Расскажите об особенностях влияния площади сопла $F_{c.kp}$ на совместную работу узлов и на характеристики двухвального (многовального) ТРДД со смещением потоков при $T_r^* = \text{const}$.

23. Каковы особенности влияния площади соплового аппарата $F_{c.a.вд}$ на совместную работу узлов и на характеристики двухвальных ТРДД и ТРД при $T_r^* = \text{const}$?

24. Какое влияние на запасы устойчивой работы компрессора $\Delta K_{увд}$, $\Delta K_{унд}$ и на характеристики двухвальных ТРДД и ТРД при $T_r^* = const$ оказывает изменение площади соплового аппарата $F_{санд}$?

25. Проанализируйте процесс влияния площади сопла $F_{сгкр}$ на тягу двухвальных ТРДД и ТРД при $n_{нд} = const$.

26. Проанализируйте процесс влияния площади соплового аппарата $F_{санд}$ на тягу двухвальных ТРДД и ТРД при следующих условиях: а) $n_{нд} = const$, б) $n_{вд} = const$.

27. Каковы закономерности влияния площадей характерных сечений турбины и сопла на совместную работу узлов турбокомпрессора ВД и положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД многовальных ТРДД и ТРД? Сравните с одновальными ТРД.

28. Каковы закономерности влияния площадей характерных сечений турбины и сопла на запасы $\Delta K_{усд}$ трехвального (многовального) ТРДД? Сравните с двухвальными ТРД.

29. Каковы закономерности влияния площадей характерных сечений турбины и сопла на запасы $\Delta K_{унд}$ трехвального (многовального) ТРДД? Сравните с двухвальными ТРДД.

30. Составьте методику расчета характеристик одновального ТРД, если расчетная точка задана величинами: а) T_r^* и n при $F_{скр} = var$; б) ΔK_y и $n_{пр}$ при $F_{скр} = var$; в) T_r^* , n и π_{τ}^* при $F_{скр} = var$ и $F_{сд} = var$.

31. Составьте методику расчета характеристик трехвального ТРДД, если расчетная точка задана величинами: а) T_r^* и $n_{нд}$ при $F_{сгкр} = var$; б) T_r^* и $\pi_{кнд}$ при $F_{свкр} = var$; в) T_r^* , $n_{нд}$ и $\Delta K_{унд}$ при $F_{сгкр} = var$ и $F_{свкр} = var$.

32. Составьте методику расчета характеристик двухвального ТРДД, если расчетная точка задана величинами: а) T_r^* и $\Delta K_{увд}$ при $F_{савд} = var$; б) T_r^* , $\Delta K_{увд}$, $n_{нд}$ и $\pi_{кнд}^*$ при $F_{савд} = var$, $F_{сгкр} = var$ и $F_{свкр} = var$; в) T_r^* и $F_{санд} = f(n_{пр. в вд})$ при $F_{санд} = var$.

Задачи*

1. Рассчитать положение линии совместной работы на характеристике компрессора (рис. 5.43, а) одновального ТРД для двух законов регулирования: а) при нерегулируемых сечениях; б) при $F_{с.кр} = vaз$ из условия обеспечения закона регулирования $T_c^* = const = 1400 K$, $n = const$, если при $n_0 = 100\%$ степень повышения давления $\pi_{к_0}^* = 10$, $T_{г_0}^* = 1400 K$.

2. На характеристику компрессора (рис. 5.43, а) одновального ТРД, имеющего в исходной расчетной точке $n_0 = 100\%$, $\pi_{к_0}^* = 10$, $T_{г_0}^* = 1400 K$, $\pi_{г_0}^* = 2,64$, $\eta_T^* = 0,91$ нанести: а) линии $T_{г_0}^* = 1600, 1400$ и $1200 K$; б) линии $T_{г_0}^* = 1600, 1400$ и $1200 K$ для увеличенной на 10% площади соплового аппарата турбины; в) линию совместной работы для исходных площадей $F_{с.кр}$ и $F_{с.а}$; г) линию совместной работы для $\delta F_{с.кр} = +10\%$ при $F_{с.а} = const$; д) линию совместной работы для $\delta F_{с.а} = +10\%$ при $F_{с.кр} = const$.

3. Для одновального ТРД с $F_{с.кр} = vaз$, имеющего в исходной расчетной точке $n_0 = 100\%$, $\pi_{к_0}^* = 10$, $T_{г_0}^* = 1400 K$, $\pi_{г_0}^* = 2,64$, $\eta_T^* = 0,91$, из условия обеспечения заданного расположения линии совместной работы на характеристике компрессора (рис. 5.43, б) определить закономерности изменения $\bar{n}_{лр.г} = f(T_{г_0}^*)$ и $F_{с.кр} = f(T_{г_0}^*)$.

4. Для одновального ТРД, имеющего в исходной расчетной точке (рис. 5.43, а) $n_0 = 100\%$, $\pi_{к_0}^* = 10$, $T_{г_0}^* = 1400 K$, $\pi_{г_0}^* = 2,64$, $\eta_T^* = 0,91$ и $F_{с.а} = 0,098 m^2$, из условия обеспечения заданной закономерности $\bar{n}_{лр.г} = f(T_{г_0}^*)$ (см. кривую 5 на рис. 5.3, в) рассчитать кривую потребного изменения площади $F_{с.а} = f(T_{г_0}^*)$.

5. Задан закон регулирования площади $F_{с.кр} = f(T_{г_0}^*)$ (см. кривую 2 на рис. 5.3, г). Определить соответствующую ему закономерность $\bar{n}_{лр.г} = f(T_{г_0}^*)$, если известно, что в исходной расчетной точке одновального ТРД $n_0 = 100\%$, $\pi_{к_0}^* = 10$, $T_{г_0}^* = 1400 K$, $\pi_{г_0}^* = 2,64$ и $\eta_T^* = 0,91$ (характеристика компрессора дана на рис. 5.43, а).

6. Как изменится величина π_k для одновального ТРД в САУ на земле при $M_0 = 0$ ($\pi_{к_0}^* = 12$, $\eta_{к_0}^* = 0,85$, $T_{г_0}^* = 1200$, $\pi_{г_0}^* = 3,75$, $\eta_T^* = 0,91$):

* В задачах I-9 и I3-I6 истечение газа из сопла и соплового аппарата предполагается сверхкритическим, коэффициенты потерь и КПД турбин - постоянными, а изменением массы рабочего тела по тракту двигателя можно пренебречь. Индексом "0" обозначены параметры максимального режима в САУ на уровне моря при $M_0 = 0$, который принят за исходный.

а) если площадь сопла увеличится на 10% ($F_{c.a} = const$) при:

1) $q(\lambda_g) = const$, 2) $T_{r.np}^* = const$;

б) если площадь соплового аппарата увеличится на 10% ($F_{c.kp} = const$) при: 1) $q(\lambda_g) = const$, 2) $T_{r.np}^* = const$ (КПД узлов предполагаются постоянными).

7. Определить зависимость $F_{c.kp} = f(T_H^*)$ в диапазоне изменения T_H^* от 288 до 400 К из условия обеспечения следующих законов регулирования одновального ТРД на максимальном режиме:

а) $T_r^* = 1400$ К = const, $n = 100\% = const$;

б) $T_r^* = 1400$ К = const, $n_{np} = 100\% = const$;

в) $T_r^* = 1400$ К = const, $\Delta K_y = 16\% = const$;

г) $n = 100\% = const$, $\Delta K_y = 16\% = const$, если задана характеристика компрессора (рис. 5.43, а) и известно, что в исходной расчетной точке $n_0 = 100\%$, $\pi_{k_0}^* = 10$, $T_{r_0}^* = 1400$ К, $\pi_{r_0}^* = 2,64$, $\eta_{r_0}^* = 0,91$, $F_{c.kp_0} = 0,237$ м².

8. Закон регулирования ТРД на максимальном режиме задан постоянной температурой $T_r^* = 1400$ К и зависимостью $F_{c.kp} = f(T_H^*)$, (см. штриховую кривую на рис. 5.17). Определить частоту вращения ротора при $T_H^* = 350$ и 420 К, если задана характеристика компрессора (рис. 5.43, а) и известно, что в исходной точке $n_0 = 100\%$, $\pi_{k_0}^* = 10$, $T_{r_0}^* = 1400$ К, $\pi_{r_0}^* = 2,64$; $\eta_{r_0}^* = 0,91$.

9. Дана характеристика компрессора с $T_{r.np}^* = var$ и с линиями совместной работы для различных площадей $F_{c.kp} = var$ (рис. 5.1). Определить потребное изменение площади $F_{c.kp} = f(T_H^*)$ при изменении T_H^* в диапазоне от 288 до 450 К на максимальном режиме одновального ТРД из условия обеспечения заданного закона регулирования $n = f(T_H^*)$ и $T_r^* = f(T_H^*)$ (см. сплошные кривые на рис. 5.14).

10. Даны обобщенные характеристики одновального ТРД с $F_{c.kp} = var$ (см. рис. 5.2, б). Рассчитать зависимость $R = f(T_H^*)$ при $H = 0$ ($\rho_H = 101325$ Па), $M_H = 0$ в диапазоне изменения температуры T_H^* от 270 до 320 К для максимального режима ТРД, регулируемого по законам:

а) $T_r^* = 1400$ К = const, $n = 95\% = const$;

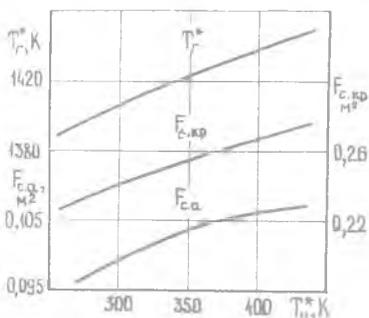
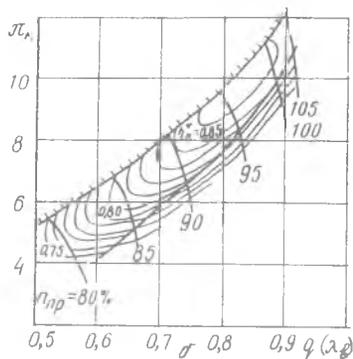
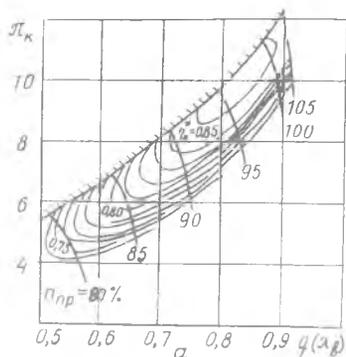
б) $T_r^* = 1400$ К = const, $n_{np} = 95\% = const$.

11. Даны характеристики одновального ТРД с $F_{c.kp} = var$ (см. рис. 5.12, б). Выбрать оптимальную программу регулирования $n = f(R)$ и $T_r^* = f(R)$ в условиях $H = 11$ км, $M_H = 1$, обеспечивающую минимальный удельный расход топлива в диапазоне изменения

тяги от 2500 до 1500 даН. Нанести соответствующую этой программе линию совместной работы на характеристику компрессора (рис.5.12а).

12. Даны обобщенные характеристики одновального ТРД с $F_{c,кр} = vaз$ (рис. 5.2,а). Выбрать закон регулирования на максимальном режиме $n = f(T_H^*)$ при $T_{г^*} = 1600$ К из условия обеспечения заданных значений взлетной тяги в САУ на земле при $M_{г1} = 0$, $R = 9500$ даН и максимальной тяги $R = 4500$ даН при $H=11$ км $M_{г1} = 2,2$ (изменение частоты n в диапазоне от $T_H^* = 268$ до 426 К принять линейным).

13. Для одновального ТРД с $F_{c,кр} = vaз$, $F_{c,a} = vaз$, имеющего в исходной точке $\pi_0 = 100\%$, $T_{г^*} = 1400$ К, $\pi_{г^*} = 2,64$, $\gamma_{г^*} = 0,91$, определить потребное изменение площадей $F_{c,кр} = f(T_{г^*})$ и $F_{c,a} = f(T_{г^*})$ в диапазоне $T_{г^*}$ от 1400 до 900 К из условия обеспечения заданных значений $\pi_{np,r} = \pi_{np,0} = const$, $\Delta k_y = 16\% = const$ (характеристика компрессора дана на рис.5.43а).



Р и с.5.43. Характеристика компрессора: а - без линий совместной работы; б - с линией совместной работы

Р и с.5.44. Закон регулирования одновального ТРД с тремя регулирующими факторами

14. Максимальный режим одновалвного ТРД с тремя регулирующими факторами задан законом регулирования температуры $T_c^* = f(T_H^*)$ и площадей $F_{с.кр} = f(T_H^*)$, $F_{с.а} = f(T_H^*)$ (см.рис. 5.44). Определить соответствующее этому режиму положение линии совместной работы на характеристике компрессора (рис.5.43,а) и кривую изменения частоты вращения $n = f(T_H^*)$, если известно, что в исходной точке при $T_H^* = 288 \text{ К}$, $n_0 = 100\%$, $\pi_{\kappa_0} = 10$, $\eta_{\tau_0} = 0,91$.

15. Для одновалвного ТРД, регулируемого из условия сохранения постоянной рабочей точки на характеристике компрессора, в САУ на земле при $M_{п} = 0$, $T_{c_0}^* = 1600 \text{ К}$, $\pi_{\kappa_0}^* = 12$, $\pi_{\tau_0}^* = 2,58$, $\eta_{\tau_0}^* = 0,91$. Определить, как изменятся площади $F_{с.а}$ и $F_{с.кр}$, если: а) температура T_H^* увеличилась на 20% при $T_c^* = const$; б) температура T_c^* снизилась на 20% при неизменных внешних условиях?

16. Как изменяются удельные параметры и тяга одновалвного ТРД, если при $T_c^* = const$ и неизменных внешних условиях площади $F_{с.кр}$ и $F_{с.а}$ увеличить на 10%. КПД узлов и коэффициенты потерь предполагаются постоянными.

Приложение I

ОТВЕТЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

3. При $T_{г-пр}^* = 1400; 1200$ и 1000 К получаем соответственно $\bar{n}_{пр.р} = 1; 1,04; 1,1$ и $\bar{F}_{г.кр} = 1; 1,1; 1,23$.
4. При $T_{г-пр}^* = 1400, 1250$ и 1100 К площадь соплового аппарата соответственно равна $F_{с.а} = 0,098; 0,0996$ и $0,1038$ м².
5. При $T_{с.пр}^* = 0,9; 0,8$ и $0,7$ величины $\bar{n}_{пр.р}$ соответственно равны $1,02; 1,05$ и $1,09$.
6. Степень повышения давления компрессора при $q(\lambda_g) = const$ и $T_{г-пр}^* = const$ соответственно равна:
 - а) $\pi_k^* = 11,5$ и $13,8$; б) $\pi_k^* = 11,15$ и $10,1$.
7. При $T_H^* = 400$ К площадь $F_{с.кр}$ равна: а) $0,25$; б) $0,4$; в) $0,255$; г) $0,254$ м².
8. При $T_H^* = 350$ и 420 К имеем соответственно $n = 102$ и 100% .
9. При $T_H^* = 288; 357; 390$ и 450 К имеем соответственно $F_{с.кв} = 0,245; 0,25; 0,262$ и $0,269$ м².
10. При $T_H = 270; 288$ и 320 К тяга соответственно равна:
 - а) $R = 8500; 7500$ и 5500 Дин; б) $R = 8090; 7500$ и 5910 Дин.
12. При $T_H^* = 288$ и 426 К частота вращения ротора $n = 100$ и 97% .
13. При $T_{г-пр}^* = 1400; 1100$ и 900 К получаем соответственно $F_{с.кр} = 0,237; 0,248; 0,253$ м² и $F_{с.а} = 0,098; 0,1$ и $0,097$ м².
14. Линия совместной работы определяется соответственно величинами: при $n_{пр} = 100, 95, 90, 85$ и 80% $\pi_k^* = 10; 8,5; 7; 5,6; 4,4$. При $T_H^* = 288; 350$ и 400 К $n = 100; 101$ и 102% .
15. а) $\sigma F_{с.а} = -8,7\%$; $\sigma F_{с.кр} = +11\%$; б) $\sigma F_{с.а} = -10,6\%$, $\sigma F_{с.кр} = +14\%$.
16. $\sigma R = 10\%$.

П р и л о ж е н и е 2

Т а б л и ц а перевода некоторых единиц измерения физических величин из различных систем в международную систему СИ

Наименование и обозначение величин	Е д и н и ц а		значение в единицах СИ и кратных от них
	наименование	обозначение	
Масса	килограмм-сила-секунда в квадрате на метр	$кгс \cdot с^2 / м$	9,81 кг
Сила, вес, тяга R	килограмм-сила	$кгс$	$9,81Н = 0,981 \text{ даН}$
Давление p	килограмм-сила на квадратный метр	$кгс / м^2$	9,81 Па
	бар	бар	10^5 Па
Удельная тяга $R_{уд}$	килограмм-сила-секунда на килограмм	$кгс \cdot с / кг$	$9,81 Н \cdot с / кг = 0,981 \text{ даН} \cdot с / кг$
Удельный расход топлива $C_{уд}$, отнесенный к единице тяги	килограмм в час на килограмм-силу	$кг / (ч \cdot кгс)$	$\frac{1}{3600 \cdot 9,81} \text{ кг} / (с \cdot Н) = 1,02 \text{ кг} / (ч \cdot \text{даН})$
Мощность N	лошадиная сила	л.с	$735,5 \text{ Вт} = 0,7355 \text{ кВт}$
Удельный расход топлива C_p , отнесенный к единице работы	килограмм на лошадиную силу-час	$кг / (л.с \cdot ч)$	$\frac{1}{735,5 \cdot 3600} \text{ кг} / \text{Дж} = \frac{1}{2,7355} \text{ кг} / (\text{кВт} \cdot ч)$
Удельная работа компрессора L_k или турбины L_T , теплотворность топлива H_u , удельное количество теплоты Q , удельная энтальпия i	килокалория на килограмм	$ккал / кг$	$4,187 \cdot 10^3 \text{ Дж} / кг$
	килограмм-сила-метр на килограмм	$кгс \cdot м / кг$	9,81 Дж / кг
Удельная теплоемкость C_p , удельная газовая постоянная R , удельная энтропия S	килокалория на килограмм-градус Цельсия	$ккал / кг \cdot ^\circ\text{С}$	$4,187 \cdot 10^3 \text{ Дж} / кг \cdot \text{К}$
	килограмм-сила-метр на килограмм-градус Цельсия	$кгс \cdot м / кг \cdot ^\circ\text{С}$	9,81 Дж / кг · К
Массовый расход воздуха G_a , газа G_r , топлива G_T	килограмм в час	$кг / ч$	$0,2778 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / с$
Плотность ρ	килограмм-сила-секунда в квадрате на метр в четвертой степени	$кгс \cdot с^2 / м^4$	9,81 кг / м ³

Л и т е р а т у р а

1. А б р а м о в и ч Г.Н. Прикладная газовая динамика. М., "Наука", 1969, с. 824.
2. Авиационный двухконтурный турбореактивный двигатель Д-30. Соловьев П.А., Стульников Л.П., Кулагин В.В. и др. М., "Машиностроение", 1971, с. 132.
3. А к и м о в В.М., С т а р и к Д.Э. М о р о з о в А.А. Экономическая эффективность повышения ресурса и надежности ГТД. М., "Машиностроение", 1972, с. 172.
4. А к с е л ь р о д С.Е., А х м е д з я н о в А.М., Г а л и м з я н о в Ф.Г. и др. Термодинамический и газодинамический расчет авиационных ГТД. Уфа, Уфимский авиационный институт, 1975, с. 359.
5. Б а к у л е в В.И., М а р к о в Н.И. Расчет высотно-скоростных характеристик однокаскадных и двухкаскадных турбореактивных двигателей. М., МАИ, 1971, с. 256.
6. Б о р о в и к В.О. Определение высотно-скоростных характеристик ТРД по данным стендовых испытаний в условиях $H=0$, $M_{T1}=0$. - В кн.: "Некоторые вопросы расчета и экспериментального исследования высотно-скоростных характеристик ГТД". Сб. статей под ред. В.О.Боровика, труды № 596, Вып. Ш. М., ЦИАМ, 1974, с. 5-29.
7. В у к а л о в и ч М.П., Н о в и к о в И.И. Техническая термодинамика. М., "Энергия", 1968, с. 496.
8. Г о л у б е в В.А. Расчет высотно-скоростных характеристик двухконтурных двухвальных ТРД. М., МАИ, 1976, с. 87.
9. Г о л у б е в В.А. Расчет высотно-скоростных характеристик трехвальных двухконтурных ТРД. М., МАИ, 1976, с. 44.
10. Д о р о ф е е в В.М., Л е в и н В.Я. Испытания воздушно-реактивных двигателей. М., Оборонгиз, 1961, с. 220.
11. Ж и р и ц к и й Г.С., Л о к а й В.И., М а к с у т о в а М.К. и др. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. М., "Машиностроение", 1971, с. 620.
12. К л я ч к и н А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. М., "Машиностроение", 1969, с. 512.
13. К о л о д о ч к и н В.П. Воздушно-реактивные двигатели сверхзвуковых многорежимных самолетов. М., "Машиностроение", 1975, с. 132.

14. К о р ж Н.Д., К у л а г и н В.В., Р о н з и н В.Д. Об особенностях влияния характерных проходных сечений на основные данные ДТРД. - В кн.: "Некоторые особенности отработки конструкции и параметров авиационных газотурбинных двигателей". Пермский политехнический институт, 1967, с. 82-93.
15. К у л а г и н В.В. Совместная работа узлов и характеристики ГТД. Куйбышевский авиационный институт, 1975, с. 136.
16. К у л а г и н В.В. Совместная работа узлов многовальных ТРДД и ТРД. Их характеристики. Куйбышевский авиационный институт, 1977, с. 95.
17. К у л а г и н В.В. Вывод основных уравнений для расчета высотно-скоростных характеристик двухконтурного двигателя сложной схемы. - В кн.: "Некоторые особенности отработки конструкции и параметров авиационных газотурбинных двигателей". Пермский политехнический институт, 1967, с. 69-81.
18. К у л а г и н В.В. Метод расчета высотно-скоростных характеристик двухконтурных турбореактивных двигателей. Авиационный институт. Труды Казанского авиационного института, вып. 93. 1967, с. 84-98.
19. К у л а г и н И.И. Теория авиационных двигателей. М., Оборонгиз, 1958, с. 479.
20. К у р з и н е р Р.И. Реактивные двигатели больших сверхзвуковых скоростей полета. М., "Машиностроение", 1977, с. 215.
21. М а р к о в Н.И., Б а к у л е в В.И. Расчет высотно-скоростных характеристик турбореактивных двигателей. М., Оборонгиз, 1963, с. 80.
22. М а с л е н н и к о в М.М., Ш а л ь м а н Ю.И. Авиационные газотурбинные двигатели. М., "Машиностроение", 1975, с. 576.
23. М а с л о в В.Г. Выбор параметров и термодинамический расчет авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышевский авиационный институт, 1970, с. 195.
24. Н е ч а е в Ю.Н., Ф е д о р о в Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей, ч. П, М., "Машиностроение", 1978, с. 334.
25. Основы проектирования и характеристики ГТД (пер.с англ.). Под ред. У.Р.Хаугорна и У.Т.Ослопа. М., "Машиностроение", 1964, с. 648.
26. П а р х о м о в А.Д. Рабочие режимы многовального ГТД на полях характеристик компрессоров. М., ЦИАМ, труды №489, 1971, с. 10.

27. П а р х о м о в А.Л. Приближенные методы определения параметров ГРДД на дроссельных режимах. М., ЦИАМ, труды № 546, 1972, с. 20.
28. Реактивные двигатели. Под ред. О.В.Ланкастера (пер.с англ.). М., Воениздат, 1962, с. 668.
29. С о л о х и н Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. М., "Машиностроение", 1975, с. 356.
30. С о с у н о в В.А., Л и т в и н о в Ю.А. Неуставившиеся режимы работы авиационных газотурбинных двигателей. М., "Машиностроение", 1975, с. 216.
31. С т е ч к и н Б.С., К а з а н д ж а н П.К., А л е к с е е в А.П. и др. Теория реактивных двигателей. Рабочий процесс и характеристики. М., Оборонгиз, 1958, с. 533.
32. Теория воздушно-реактивных двигателей. Под ред. С.М.Шляхтенко. М., "Машиностроение", 1975, с. 568.
33. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин Н.В. и др. М., "Машиностроение", 1973, с. 144.
34. Ф л о р о в И.Ф. Некоторые соотношения между параметрами и характеристиками двухконтурных турбореактивных двигателей с различными контурами. М., ЦИАМ, труды № 457, с. 20.
35. Х о л щ е в н и к о в К.В. Согласование параметров компрессора и турбины в авиационных газотурбинных двигателях. М., "Машиностроение", 1965, с. 200.
36. Ч е р к а с о в Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М., "Машиностроение", 1974, с. 376.
37. Ч е р к е з А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. М., "Машиностроение", 1965, с. 356.
38. Ш е в я к о в А.А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. М., "Машиностроение", 1970, с. 660.
39. Ю г о в О.К., С е л и в а н о в О.Д. Согласование характеристик самолета и двигателя. М., "Машиностроение", 1975, с. 204.
40. Я н к и н В.И. Система программ для расчета характеристик ВРД. М., "Машиностроение", 1976, с. 167.
41. Т у н а к о в А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. М., "Машиностроение", 1979, с. 184.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие.....	3
Основные условные обозначения.....	5
Г л а в а У. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ ТРДД (ТРД) С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЛОЩАДЯМИ ХАРАКТЕРНЫХ СЪЕЧЕНИЙ. ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	9
§ 5.1. Особенности совместной работы узлов турбоком- прессора с изменяемым сопротивлением на выходе. Характеристики одновального ТРД с $F_{с.кр} = vaг$..	9
5.1.1. Особенности совместной работы узлов и обобщенные характеристики.....	9
5.1.2 Особенности регулирования одновального ТРД с $F_{с.кр} = vaг$ и его характеристики на максимальном режиме.....	15
5.1.3. Особенности регулирования и характерис- тики одновального ТРД с $F_{с.кр} = vaг$ на режимах пониженной тяги.....	24
5.1.4. Структурные схемы регулирования ТРД с $F_{с.кр} = vaг$	27
§ 5.2. Особенности совместной работы узлов турбоком- прессора с регулируемым сопловым аппаратом, соплом и компрессором и характеристики соот- ветствующего одновального ТРД.....	29
5.2.1. Особенности совместной работы узлов и обобщенные характеристики турбоком- прессора (ТРД) с $F_{с.а} = vaг$	30

5.2.2. Особенности совместной работы узлов, регулирования и характеристики турбокомпрессора (ТРД) с $F_{с.а} = \text{var}$, $F_{с.кр} = \text{var}$..	33
5.2.3. Особенности работы турбокомпрессора (ТРД) с регулируемыми направляющими аппаратами (НА) и перепуском воздуха из компрессора.....	37
§ 5.3. Особенности влияния площадей характерных сечений на совместную работу узлов и характеристики многовальных ТРДД и ТРД.....	45
5.3.1. Особенности влияния площади сопла.....	45
5.3.2. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины ВД.....	51
5.3.3. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины НД.....	56
5.3.4. Особенности влияния площадей характерных сечений и управления компрессором на совместную работу узлов многовальных ТРДД и ТРД.....	59
§ 5.4. Особенности расчета характеристик ТРДД и ТРД с регулируемыми площадями характерных сечений. 62	
5.4.1. Особенности расчета характеристик одновального ТРД с регулируемыми площадями характерных сечений.....	63
5.4.2. Особенности расчета характеристик многовальных ТРДД (ТРД) с $F_{с.кр} = \text{var}$	64
5.4.3. Особенности расчета характеристик многовальных ТРДД (ТРД) с $F_{с.а вД} = \text{var}$ и $F_{с.а нД} = \text{var}$, а также с регулируемыми площадями других сечений.....	66
В ы в о д ы	69
К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы	72
З а д а ч и	76
Приложение 1. Ответы к решению задач.....	80
Приложение 2. Таблица перевода некоторых единиц измерения физических величин из различных систем в международную систему (СИ).....	81
Л и т е р а т у р а	82

К у л а г и н Виктор Владимирович

О С О Б Е Н Н О С Т И
СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ
И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРДД (ТРД)
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЛОЩАДЯМИ
ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ

Учебное пособие

Редактор Э.Г р я з н о в а
Техн.редактор Н.К а л е н ю к
Корректор С.Р у б а н

Подписано в печать 7.05.80. ЕО 00378.
Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.
Печать оперативная. Усл.п.л. 5,1. Уч.-изд.л.4,8.
Тираж 500 экз. Заказ № 3297 цена 15 коп.

Куйбышевский авиационный институт им.С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодотвардейская, 151.

Ротапечатьный цех областной типографии им.В.П.Мяги,
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.