

УДК 629.7.036.001(07.58)

Исследование влияния параметров рабочего процесса на удельные параметры двухкамерного турбореактивного двигателя

В.Л. Письменный

Выполнена количественная оценка диапазона изменения значений удельных (тяговых и расходных) параметров двухкамерного турбореактивного двигателя. Сделан анализ влияния условий полета на указанные параметры. Проведено сравнение с одноконтурным ТРД

В работах [1,2] исследованы термодинамические циклы двухкамерного турбореактивного двигателя (ТРДК) [3], даны основные математические соотношения. Схема ТРДК с обозначением характерных сечений показана на рис. 1.

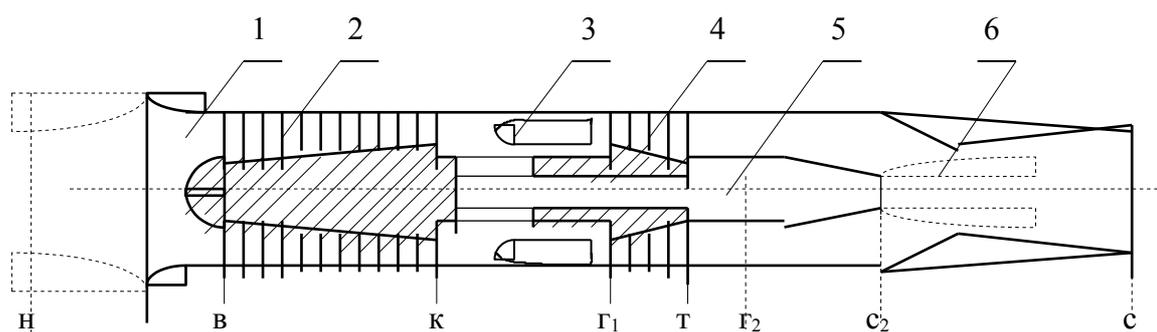


Рис. 1

Двухкамерный ТРД состоит из входного устройства 1, компрессора 2, основной камеры сгорания 3, турбины 4, дополнительной камеры сгорания 5, эжекторного сопла 6. При этом основная камера сгорания 3 расположена между компрессором 2 и турбиной 4, а дополнительная камера сгорания 5 расположена между турбиной 4 и эжекторным соплом 6 и соединена с компрессором 2 каналом, проходящим через вал двигателя.

В газотурбинных двигателях прямой реакции, к которым относятся ТРДК, работа циклов расходуется на увеличение кинетической энергии газоздушного потока, проходящего через двигатель:

$$L_e = \frac{W_c^2 - V_n^2}{2}.$$

Откуда, выражение удельной тяги при полном расширении в реактивном сопле и коэффициенте изменения массы $\beta_r = 1$ имеет вид:

$$P_{уд} = \sqrt{2 \cdot Le + V_{п}^2} - V_{п} ,$$

которое однозначно связывает $P_{уд}$ и Le .

Из полученного уравнения следует, что при $V_{п} \approx \text{const}$ ($M_{п} = \text{const}$, $H = \text{const}$) $P_{уд}$ при изменении P_k^* и $T_{г}^*$ качественно ведет себя так же, как Le , т.е. имеет максимум и обращается в нуль там же, где и Le [1]. На рис.2 показано изменение $P_{уд}$ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре и коэффициента двухкамерности n [1] при условии $M_{п}=0$ и $H=0$ ($T_{г1}^*=1600$ К, $T_{г2}^*=2300$ К, $\eta_c = 0,85$, $\eta_p = 0,93$, $\sigma_{вх} = 0,98$) для двух режимов работы двигателя: с включенной и выключенной дополнительной камерой сгорания. Как видно из представленных зависимостей, “вырождение” ТРДК ($m \rightarrow 0$) для реальных коэффициентов двухкамерности происходит существенно раньше, чем энергетическое “вырождение” ТРД ($P_{уд} \rightarrow 0$), что связано с уменьшением свободной работы основного цикла.

Удельный расход топлива при отсутствии отбора воздуха $\delta_{отб} = 0$ определяется по известной формуле [4]

$$C_{уд} = \frac{3600 \cdot q_T}{P_{уд}} , \quad (1)$$

$$\text{где } q_T = \frac{q_{T1} + m \cdot q_{T2}}{1 + m} ,$$

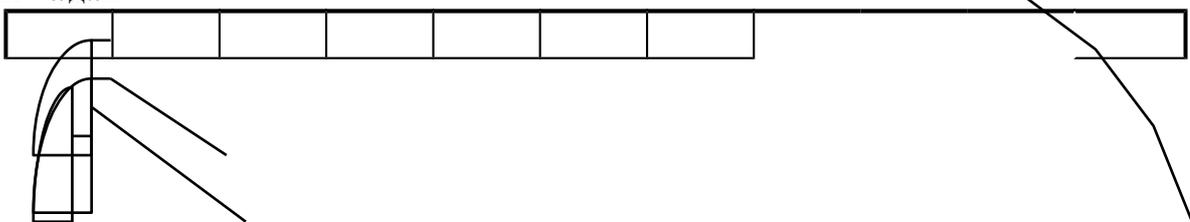
q_{T1} - относительный расход топлива в первом контуре,

q_{T2} - относительный расход топлива во втором контуре,

m - коэффициент двухконтурности.

На рис.3 показано изменение $C_{уд}$ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре и коэффициента двухкамерности при условии $M_{п}=0$ и $H=0$ ($T_{г1}^*=1600$ К, $T_{г2}^*=2300$ К, $\eta_c = 0,85$, $\eta_p = 0,93$, $\sigma_{вх} = 0,98$) для двух режимов работы двигателя: с включенной и выключенной дополнительной камерой сгорания. Характер изменения $C_{уд}=f(P_k)$ в ТРДК аналогичен характеру изменения $C_{уд}$ в ТРД. Так же, как и в ТРД, относительный расход топлива q_T пропорционален количеству подведенного к двигателю тепла Q , которое, в свою очередь, зависит от разности температур в камерах сгорания $T_{г1}^*$ и $T_{г2}^*$ и за компрессором T_k^* . При увеличении P_k и неизменном значении температур в камерах сгорания будет расти температура за компрессором T_k^* и, как следствие, уменьшается Q и q_T , что будет приводить к снижению $C_{уд}$ до тех пор пока не начнется активный процесс энергетического “вырождения” турбореактивного двигателя ($P_{уд} \rightarrow 0$).

$P_{уд}$, кг·с/дан



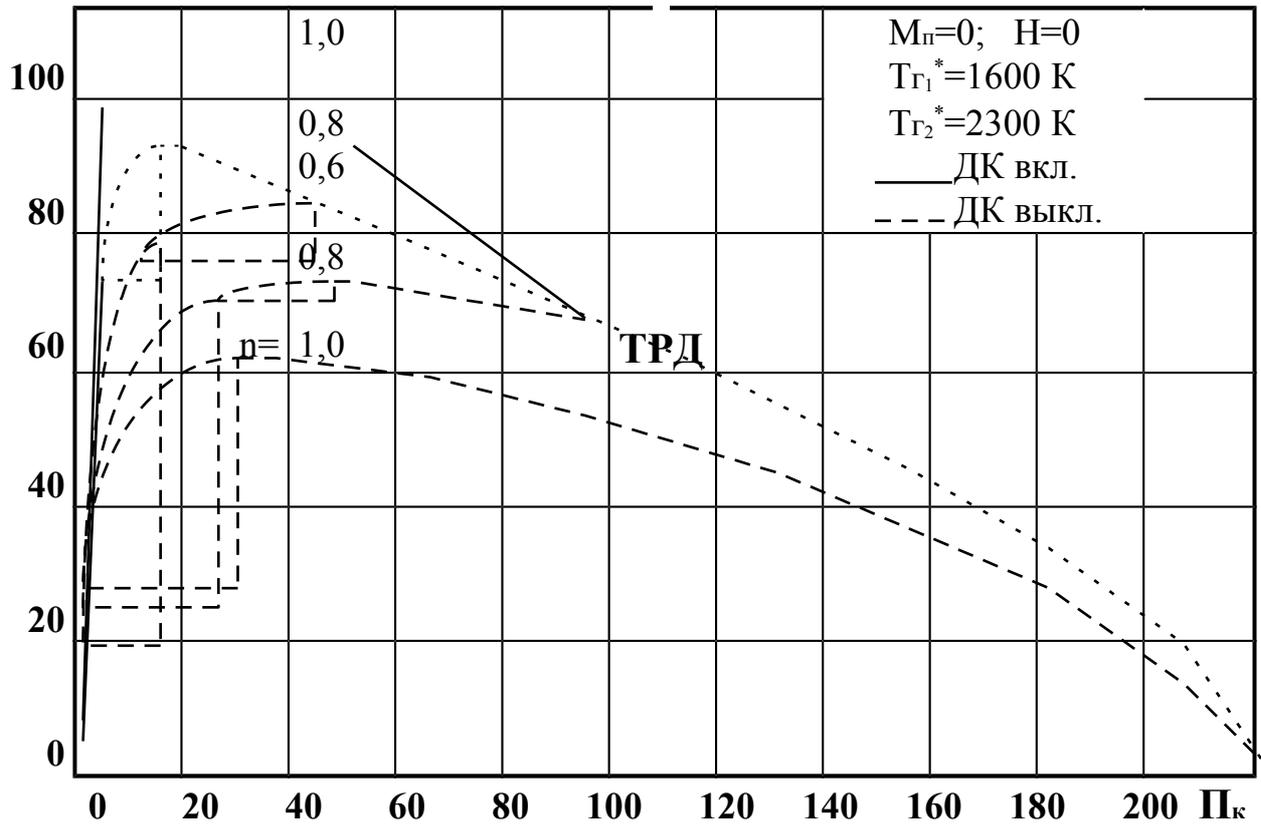


Рис. 2

Суд, кг/дан·ч

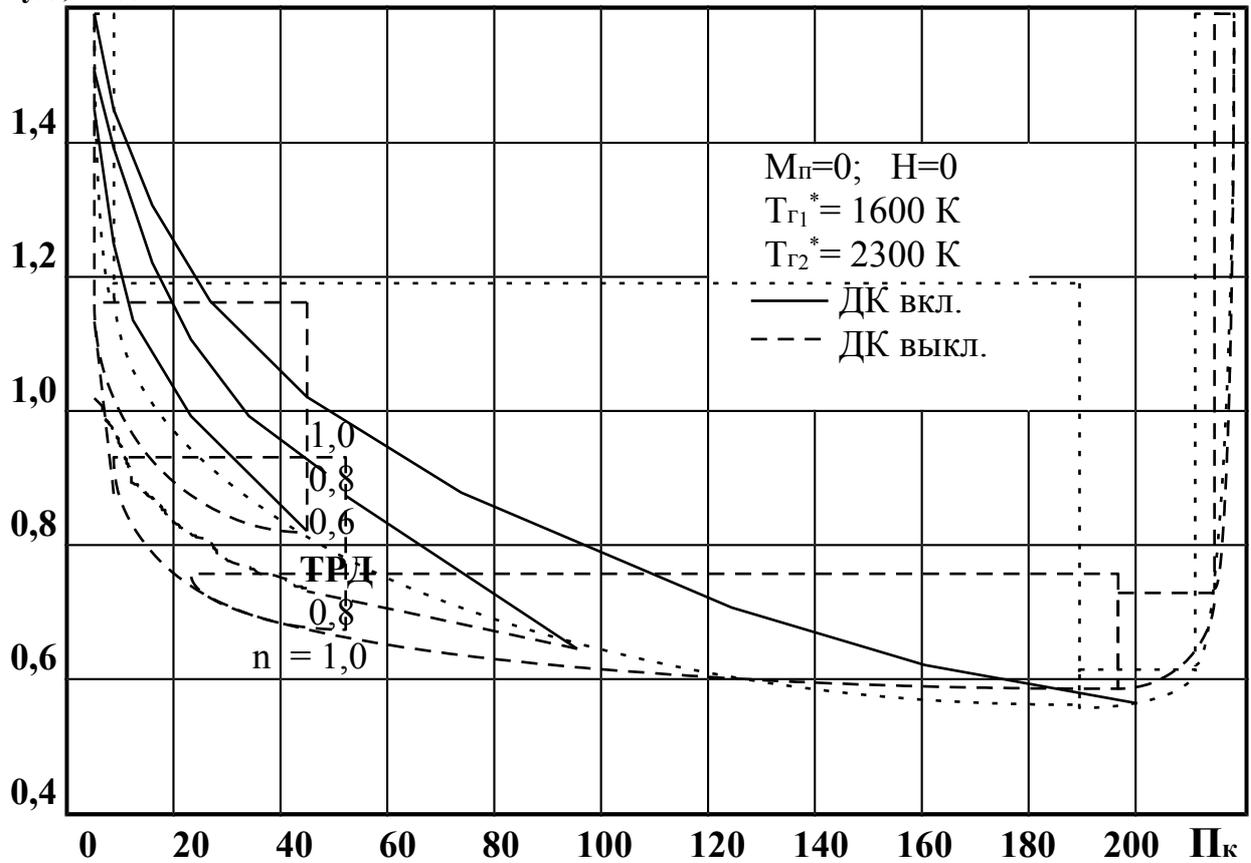


Рис. 3

Влияние коэффициента двухкамерности n на $R_{уд}$ и $C_{уд}$ ТРДК весьма значительно и определяется величиной работы дополнительного цикла, а также её долей в суммарной работе [1]. При

этом определяющим фактором является разница работ дополнительного и основного циклов. При положительной разнице увеличение доли работы дополнительного цикла приводит к увеличению суммарной работы, а при отрицательной разнице к уменьшению. В связи с этим влияние n на $P_{уд}$ и $C_{уд}$ неоднозначно:

- а) при включенной дополнительной камере сгорания (подогрев газа в дополнительной камере выше, чем в основной) повышение n приводит к росту $P_{уд}$ и $C_{уд}$, что является следствием повышения (в результате роста m) в суммарной работе доли цикла, имеющего более высокую удельную работу;
- б) при выключенной дополнительной камере сгорания (подогрев газа в дополнительной камере ниже, чем в основной) повышение n приводит к уменьшению $P_{уд}$ и $C_{уд}$, что также объясняется повышением доли работы дополнительного цикла, но уже при минимальной удельной работе (эффект двухконтурного двигателя).

Наличие дополнительного цикла в двухкамерном ТРД позволяет иметь весьма гибкую систему регулирования основных параметров двигателя и, соответственно, широкий диапазон тяговых и расходных характеристик, что является **важнейшим свойством данной схемы**.

Диапазон возможного изменения удельных параметров ТРДК определяется диапазоном изменения значений коэффициента двухконтурности двигателя, показанного на рис.4,5.

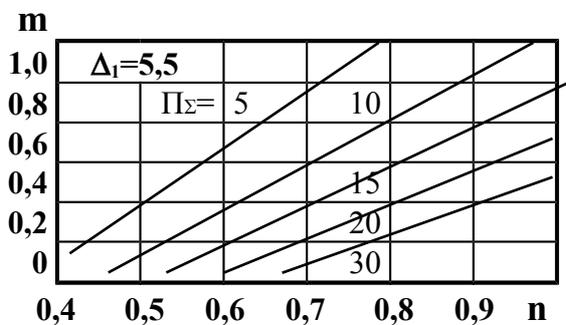


Рис. 4

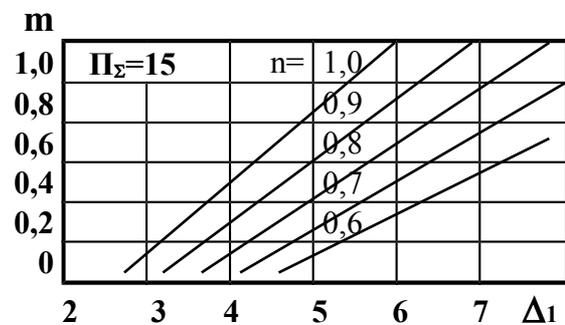


Рис. 5

На рис.4 показано изменение коэффициента двухконтурности m в зависимости от коэффициента двухкамерности n для различных степеней повышения давления Π_Σ ($\Delta_1 = 5,5$; $\eta_c = 0,85$; $\eta_p = 0,93$). На рис.5 показано изменение коэффициента двухконтурности m в зависимости от подогрева Δ_1 для различных n ($\Pi_\Sigma = 15$; $\eta_c = 0,85$; $\eta_p = 0,93$). Как видно из представленных зависимостей, коэффициент двухконтурности ТРДК для наиболее реальных параметров рабочего процесса находится в пределах значений: $0,2 \div 0,8$, что, по сути, определяет возможности двухкамерных ТРД по расширению диапазона тяговых и расходных характеристик ТРД. Последнее наглядно иллюстрируется рис.6, и 7, где показаны зависимости относительной удельной тяги $P_{уд} = P_{уд\text{ТРДК}}/P_{уд\text{ТРД}}$

и относительного удельного расхода топлива $\bar{C}_{уд} = C_{уд\text{ТРДК}}/C_{уд\text{ТРД}}$ для различных температур газа перед турбиной двигателя ($T_{Г2}^* = 2300 \text{ К}$, $\Pi_k = 15$, $\eta_c = 0,85$, $\eta_p = 0,93$, $\sigma_{вх} = 0,98$) в стартовых условиях ($M_{п=0}$; $H=0$).

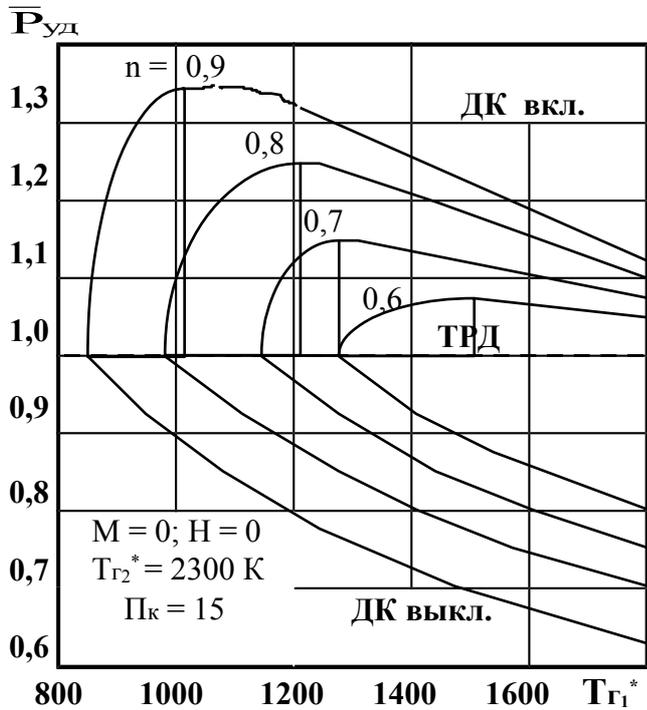


Рис. 6

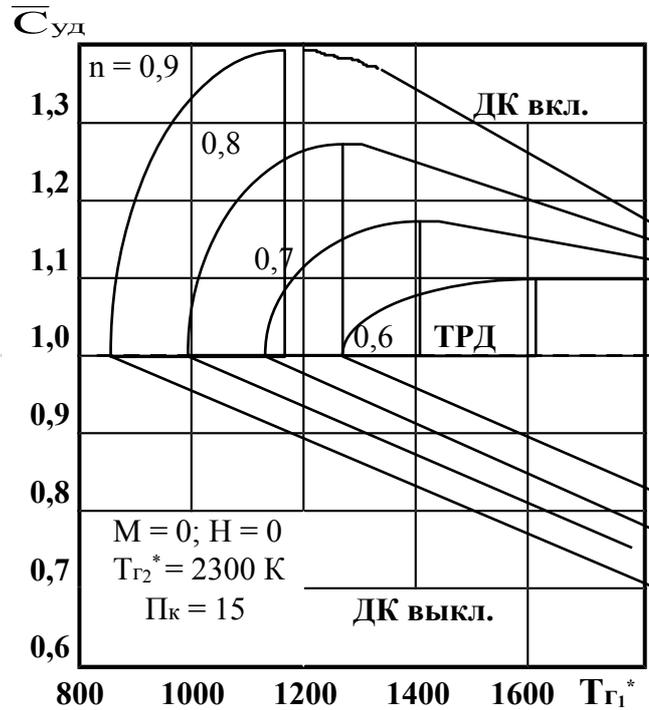


Рис. 7

Видно, что использование дополнительной камеры сгорания позволяет изменять (по отношению к ТРД) значения удельных параметров на 30 % и более. При этом изменение $P_{уд}$ и $C_{уд}$, как показывают расчеты, происходит практически пропорционально в широком диапазоне режимов работы двигателя.

На рис.8÷15 показаны закономерности протекания $P_{уд}$ и $C_{уд}$ в стартовых условиях ($M_{п=0}$; $H=0$), для $M_{п=0,9}$; $H=11 \text{ км}$, $M_{п=1,5}$; $H=11 \text{ км}$ и $M_{п=2,0}$; $H=11 \text{ км}$. Здесь же, для сравнения, показаны закономерности протекания $P_{уд}$ и $C_{уд}$ для ТРД. Характер изменения характеристик ТРДК аналогичен характеру изменения характеристик ТРД. Как видно из рис.8÷11, с ростом Π_k удельная тяга (для различных n) проходит через максимальное значение, после чего уменьшается. Такое изменение $P_{уд}$, как было показано в работе [1], связано с изменением суммарной эффективной работы циклов. Так, с ростом $M_{п}$ величина удельной тяги уменьшается за счет того, что рост скорости полета при $H \approx \text{const}$ всегда опережает рост скорости истечения из реактивного сопла из-за уменьшения Q . С увеличением высоты полета при $M_{п} \approx \text{const}$ от $H=0$ до $H=11 \text{ км}$ при прочих равных условиях L_e и $P_{уд}$ возрастают за счет увеличения подогревов Δ_1 и Δ_2 , связанного со снижением

Тн. Выше 11 км (до Н=20 км) температура воздуха Тн почти не меняется и при постоянных значениях Мп и ТГ₁^{*}, ТГ₂^{*} суммарная работа циклов и удельная тяга остаются неизменными.

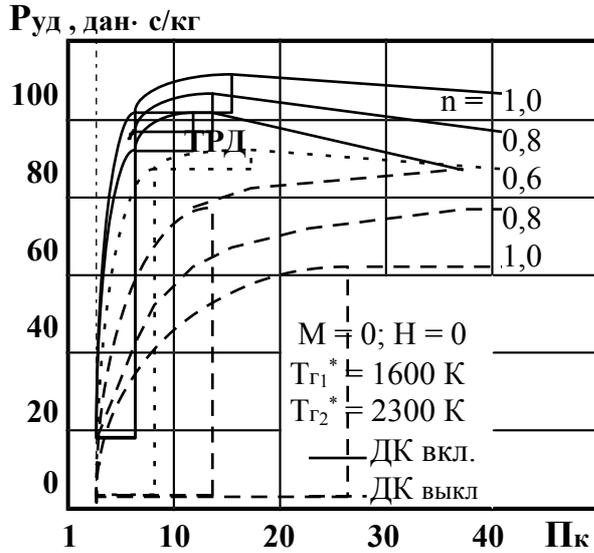


Рис. 8

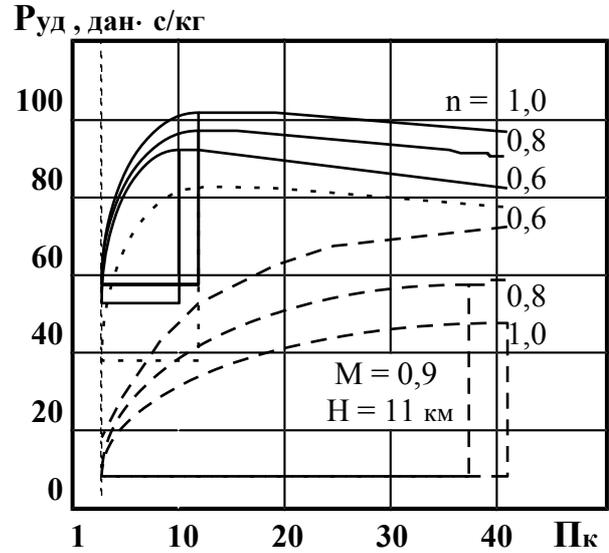


Рис. 9

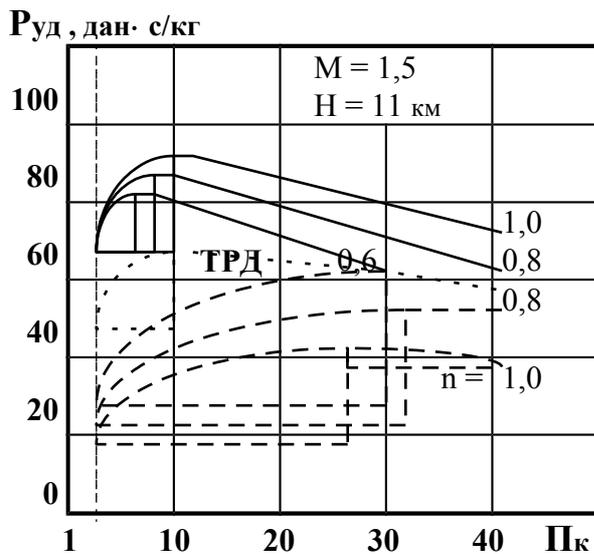


Рис. 10

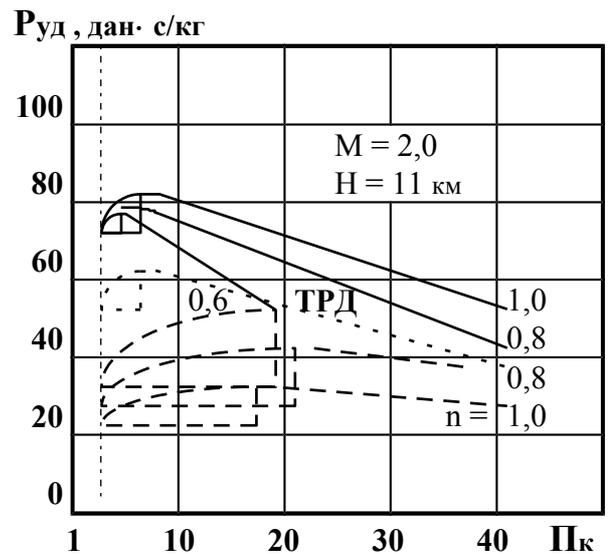


Рис. 11

Изменение $S_{уд}$ в зависимости от P_k при различных полетных условиях показано на рис.12÷15. Как видно из этих рисунков, практически при любых сочетаниях Мп и Н рост P_k в области ее рабочих значений приводит к уменьшению $S_{уд}$ из-за роста общего КПД. Рост числа Мп при работе дополнительной камеры сгорания слабо сказывается на $S_{уд}$, так как, в соответствии с уравнением (1), уменьшение $R_{уд}$ компенсируется снижением относительного расхода топлива - q_T за счет роста T_v^* и последующего роста температуры воздуха за компрессором T_k^* . Понижение режима работы дополнительной камеры сгорания, в частности ее выключение, ведет к снижению темпов умень-

шения $S_{уд}$ при увеличении $П_k$, что связано с увеличением доли внутренних потерь в суммарной работе циклов. Рост высоты полета в области от $H=0$ до $H=11$ км при $M_{п} \approx \text{const}$ слабо влияет на величину $S_{уд}$, так как при этом увеличение $R_{уд}$ происходит в связи с увеличением q_T , зависящего от $T_{в}^*$ и $T_{к}^*$. В диапазоне высот $H=11 \div 20$ км при прочих равных условиях $S_{уд}$ остается постоянным, так как в этом диапазоне высот температура окружающей среды в соответствии со стандартной атмосферой не меняется. Диапазон возможных изменений удельных параметров при увеличении $M_{п}$ сужается, а при увеличении высоты до $H=11$ км расширяется, что объясняется влиянием скорости и высоты полета на коэффициент двухконтурности, который при прочих условиях уменьшается при увеличении скорости полета и увеличивается при увеличении высоты полета.

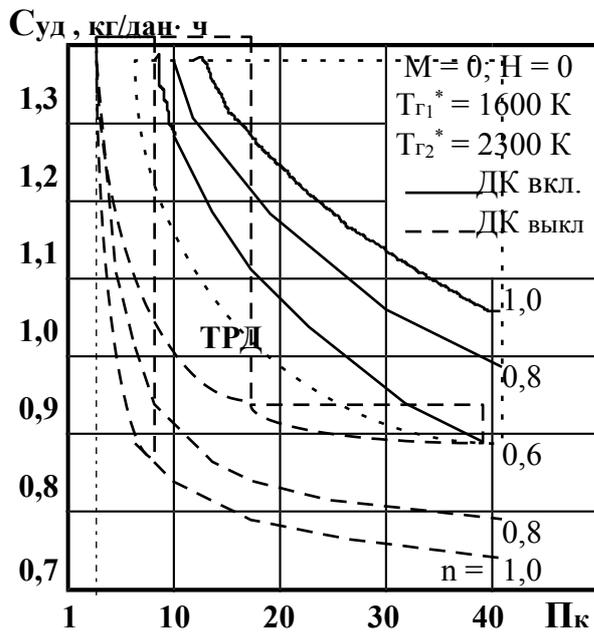


Рис. 12

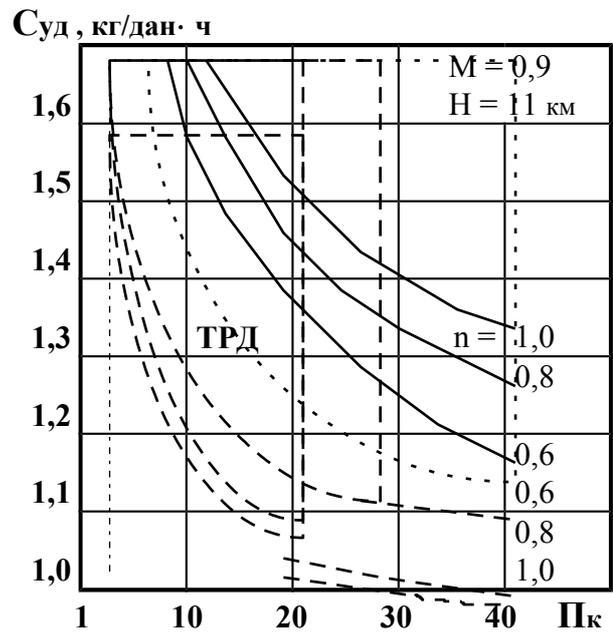
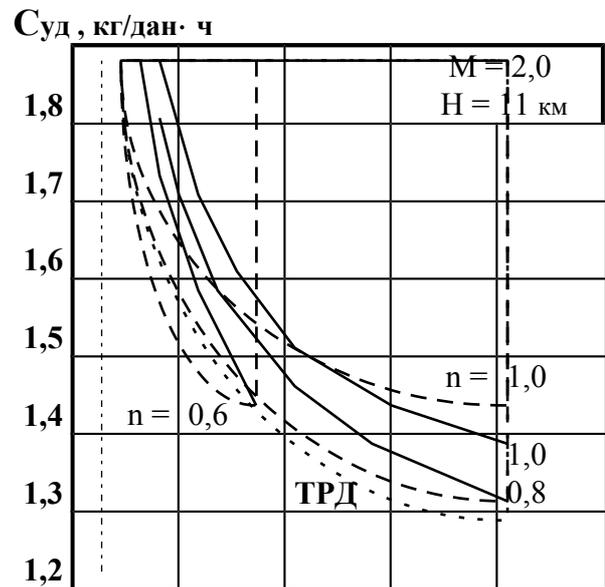
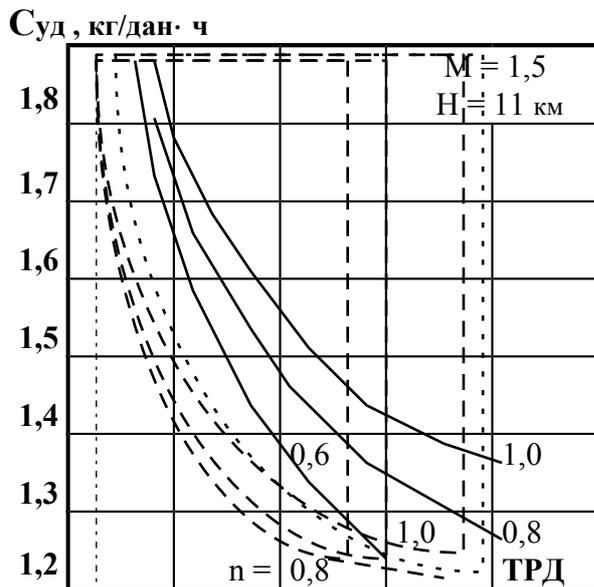


Рис. 13



1 10 20 30 40 Пк

1 10 20 30 40 Пк

Рис. 14

Рис. 15

Влияние температуры газа перед лопатками турбины $T_{Г1}^*$ на удельные параметры ТРДК иллюстрируется рис.16÷19, где показаны изменения $R_{уд}$ и $S_{уд}$ в зависимости от $T_{Г1}^*$ и n в стартовых условиях ($M_{п}=0, H=0$) и для $M_{п}=1,5; H=11$ км ($\Pi_k = 15; T_{Г2}^* = 2300$ К; $\eta_c = 0,85; \eta_p = 0,93; \sigma_{вх}$ в соответствии с кривой стандартных потерь). Здесь же, для сравнения, показаны закономерности протекания $R_{уд}$ и $S_{уд}$ для ТРД.

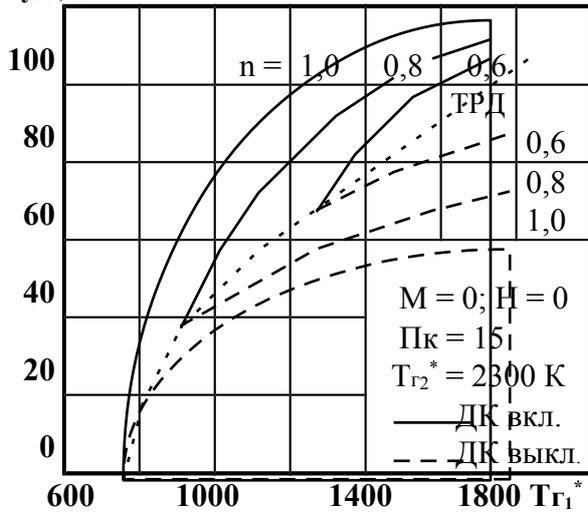
 $R_{уд}$, дан·с/кг

Рис. 16

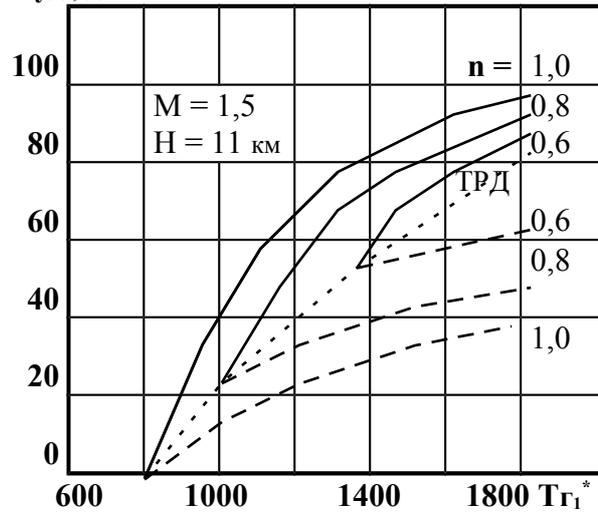
 $R_{уд}$, дан·с/кг

Рис. 17

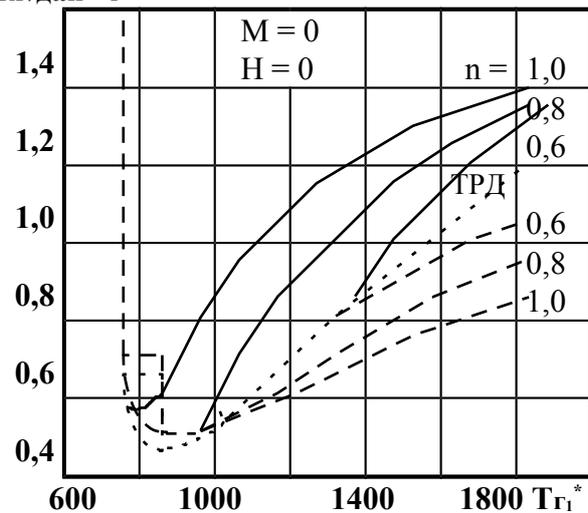
 $S_{уд}$, кг/дан·ч

Рис. 18

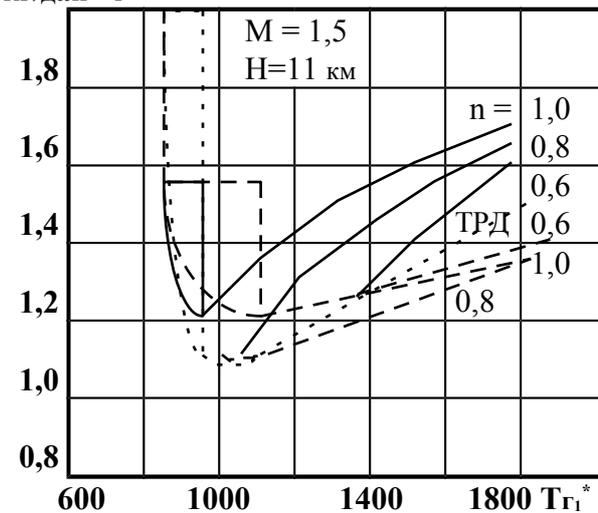
 $S_{уд}$, кг/дан·ч

Рис. 19

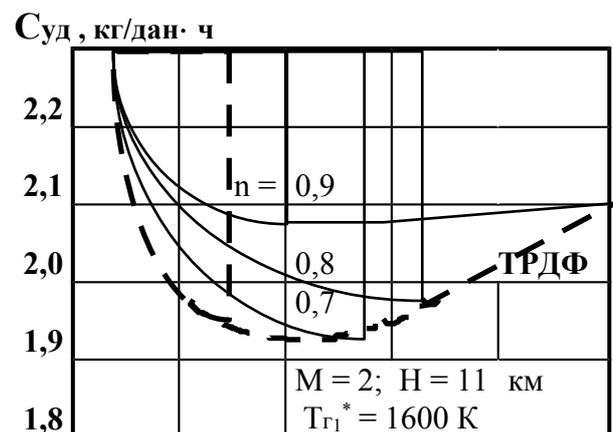
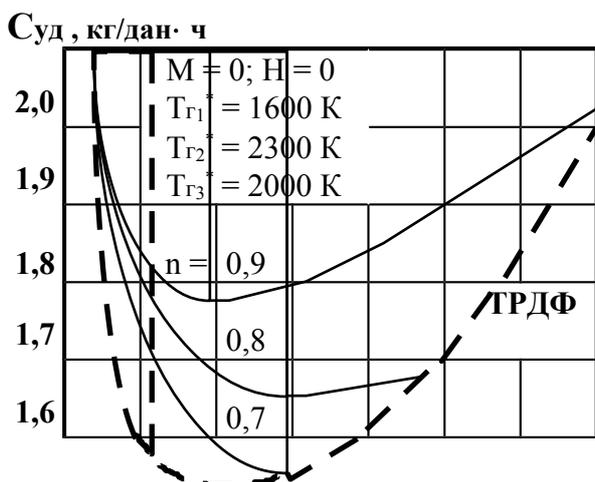
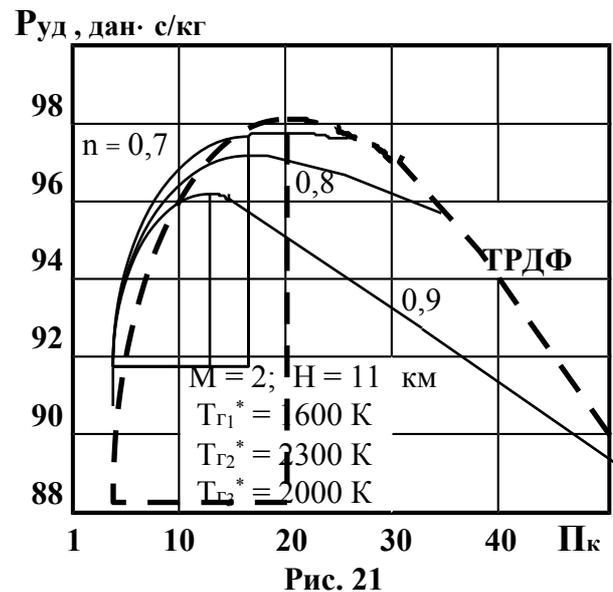
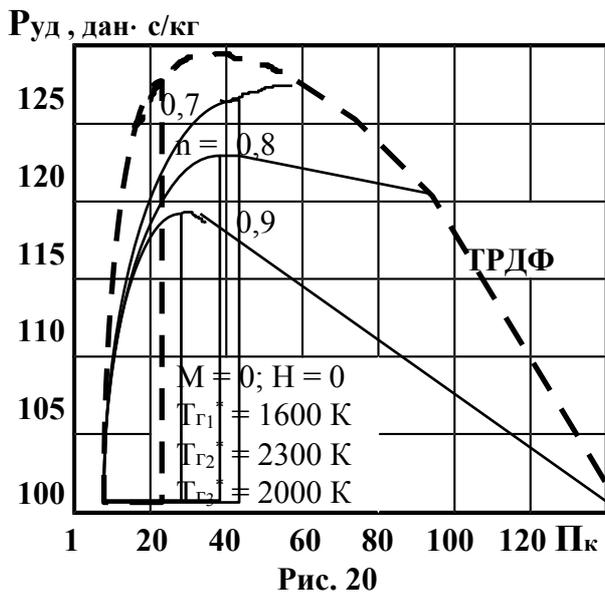
Из представленных рисунков видно, что при изменении $T_{Г1}^*$ только $S_{уд}$ имеет минимальные значения, так как при увеличении $T_{Г1}^*$ суммарная работа циклов и, соответственно, удельная тяга

монотонно растут. Физические сущности процессов, происходящих в ТРДК и ТРД при изменении температуры газов перед лопатками турбины, принципиально не отличается. Минимальные удельные расходы топлива двухкамерный ТРД имеет при температурах $T_{Г1}^*$, соответствующих температурам “вырождения” (рис18, 19). При росте $T_{Г1}^*$ удельный расход топлива монотонно возрастает за счет уменьшения полетного КПД из-за роста скорости истечения газа из сопла.

В итоге, в рабочей области по P_k с ростом последней $R_{уд}$ проходит через максимальное значение, а $C_{уд}$ все время уменьшается. В рабочей области по $T_{Г1}^*$, где $C_{уд} > C_{удmin}$, при увеличении $T_{Г1}^*$ удельная тяга и расход топлива монотонно увеличиваются. Диапазон изменения $C_{уд}$ при увеличении $T_{Г1}^*$ также увеличивается, что связано с повышением коэффициента двухконтурности m .

Рассмотрим влияние параметров рабочего процесса на удельные параметры форсированного двухкамерного турбореактивного двигателя (ТРДКФ).

На рис.20÷23 показано изменение $R_{уд}$ и $C_{уд}$ в зависимости от степени повышения давления в компрессоре и коэффициентов двухкамерности ТРДКФ в стартовых условиях и для $M_n = 2,0$; $H = 11$ км ($T_{Г1}^* = 1600$ К; $T_{Г2}^* = 2300$ К; $T_{Г3}^* = 2000$ К). Характер изменения $R_{уд}$ и $C_{уд}$ в ТРДКФ при изменении P_k определяется характером изменения суммарной работы циклов [2].



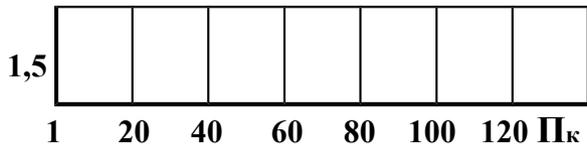


Рис. 22

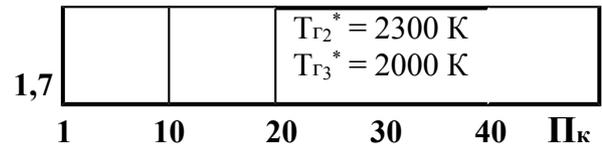


Рис. 23

Как видно из рис.20÷23, удельная тяга и удельный расход топлива у форсированных ТРДК имеют максимумы и минимумы, которые не совпадают с соответствующими значениями для нефорсированных ТРДК (см. рис.2 и рис.3). Последнее объясняется влиянием форсажного цикла, у которого вследствие более высокого, чем в основном цикле, подогрева газа, максимум работы приходится на более высокие, чем в основном цикле, степени сжатия газа. При этом, чем меньше коэффициент двухкамерности (больше доля работы форсажного цикла в суммарной работе), тем сильнее влияние форсажа на удельные параметры двигателя.

Зависимости $R_{уд}$ и $C_{уд}$ от температуры газа перед турбиной при прочих равных условиях даны на рис.24÷27.

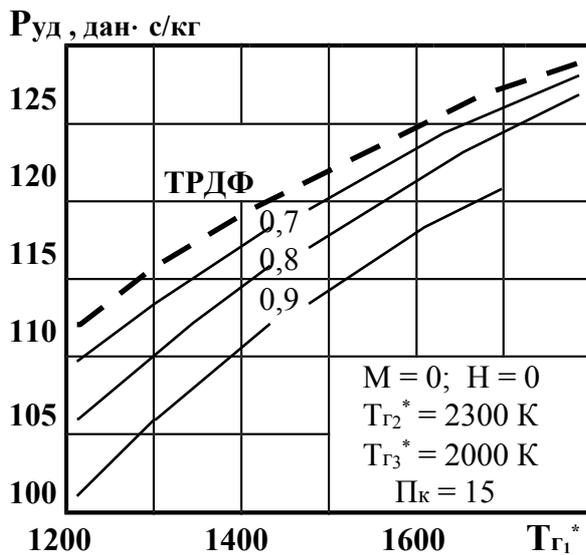


Рис. 24

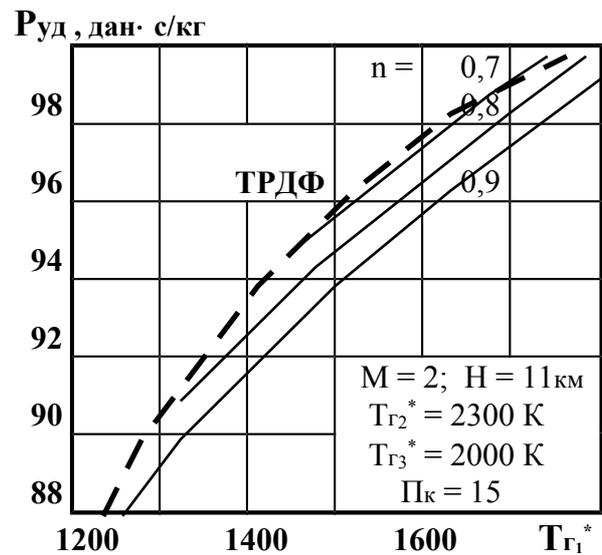
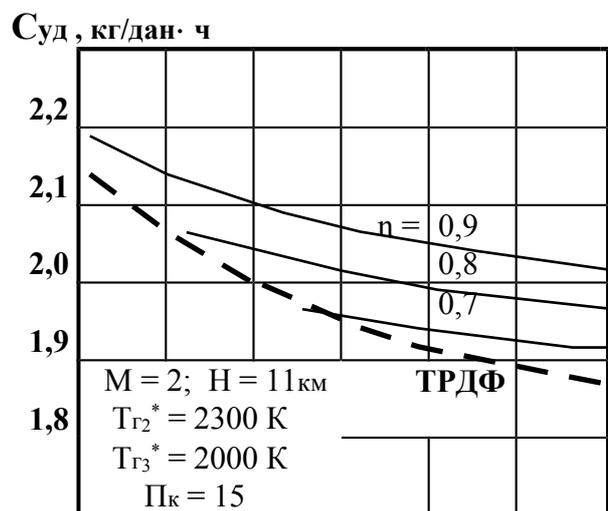
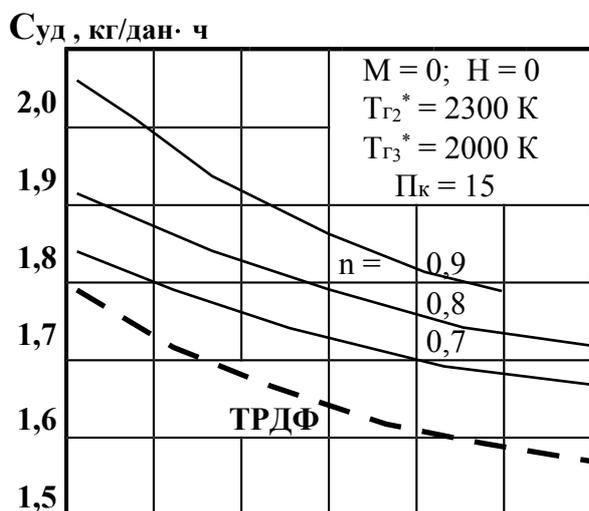


Рис. 25



1200 1400 1600 $T_{Г_1}^*$

Рис. 26

1200 1400 1600 $T_{Г_1}^*$

Рис. 27

С ростом $T_{Г_1}^*$ при $P_k = \text{const}$ уменьшается степень понижения давления на турбине P_T , что приводит к увеличению давления в форсажной камере, росту P_c и, как следствие, к увеличению $P_{уд}$ и уменьшению $C_{уд}$. Отсюда следует, что у ТРДКФ для получения наибольших значений удельной тяги и повышения экономичности необходимо повышать температуру газа перед турбиной.

Таким образом, как было показано ранее (см. рис.20÷27), уменьшение n приводит к росту $P_{уд}$ и уменьшению $C_{уд}$ форсированного двигателя. Увеличение $T_{Г_1}^*$ при неизменных P_k и $T_{Г_3}^*$ также ведет к росту $P_{уд}$ и уменьшению $C_{уд}$. При изменении P_k удельная тяга ТРДКФ проходит через максимальные значения, а удельный расход топлива через минимальные, причем, чем больше M_p , тем меньше $P_{кортф}$. С ростом M_p влияние P_k и $T_{Г_1}^*$ на $P_{уд}$ и $C_{уд}$ становится все менее значительным, так как уменьшается теплоподвод в основной камере сгорания, а P_c форсированного двигателя, главным образом, определяется динамическим сжатием во входном устройстве. Это хорошо видно из сравнения кривых, представленных на рис.20÷23 и рис.24÷27, полученных для различных M_p .

Заключение. Двухкамерный ТРД обладает весьма гибкой системой регулирования основных удельных параметров, позволяющей иметь существенно более широкий, чем у ТРД (ТРДФ), диапазон тяговых и расходных характеристик.

Двухкамерный ТРД может быть рекомендован для использования на многорежимных летательных аппаратах.

Список литературы

1. Письменный В.Л. Исследование термодинамического цикла двухкамерного турбореактивного двигателя. Электронный журнал "Труды МАИ" №6, 27.11.2001 г.
2. Письменный В.Л. Исследование термодинамического цикла двухкамерного форсированного турбореактивного двигателя. Электронный журнал "Труды МАИ" №8, 22.05.2002 г.
3. Двухкамерный турбореактивный двигатель (варианты). Патент RU 2187009 - МПК F02 К 3/04 / В.Л.Письменный. - №2000104340/06, заявлено 21.02.2000. - Опубл. 10.08.02, Бюл.. № 22.
4. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч.2. Москва, Машиностроение, 1978 г., 336 с.

*Письменный Владимир Леонидович, доцент кафедры испытаний авиационной техники филиала
“Взлет” Московского государственного авиационного института (технического университета),
к.т.н.*