

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.

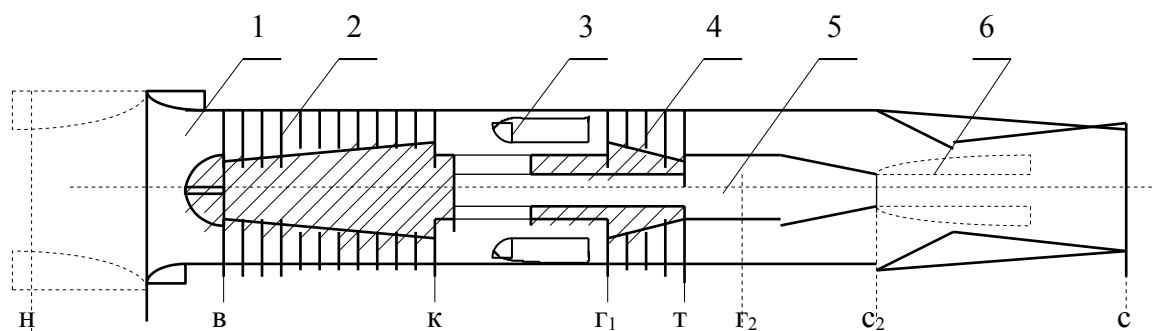


Рис. 1

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  $P_{к}^*$  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]

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

$$\text{где } q_{г} = \frac{q_{г1} + m \cdot q_{г2}}{1 + m} ,$$

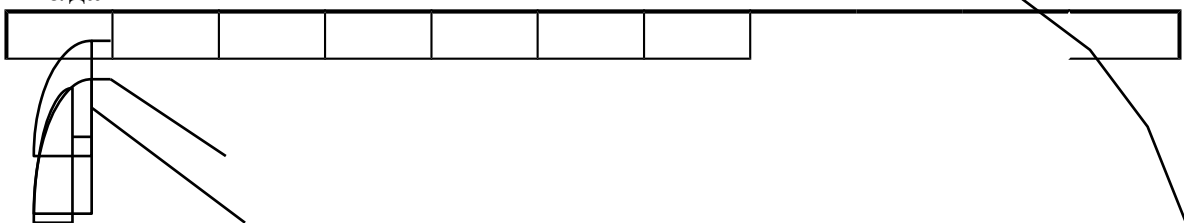
$q_{г1}$  - относительный расход топлива в первом контуре,

$q_{г2}$  - 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  $C_{уд}=f(P_{к})$  в ТРДК аналогичен характеру изменения  $C_{уд}$  в ТРД. Так же, как и в ТРД, относительный расход топлива  $q_{г}$  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  $T_{к}^*$ . При увеличении  $P_{к}$  и неизменном значении температур в камерах сгорания будет расти температура за компрессором  $T_{к}^*$  и, как следствие, уменьшается  $Q$  и  $q_{г}$ , 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



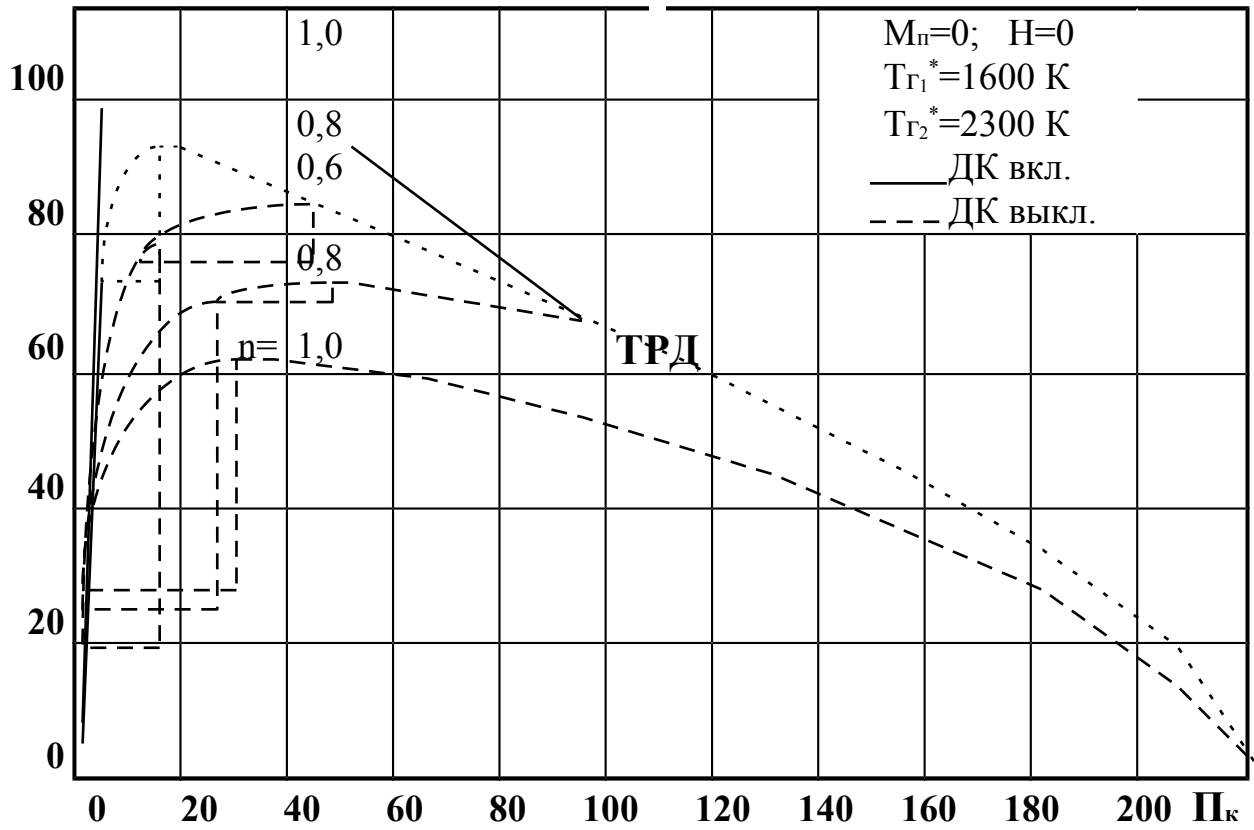


Рис. 2

Суд, кг/дан·ч

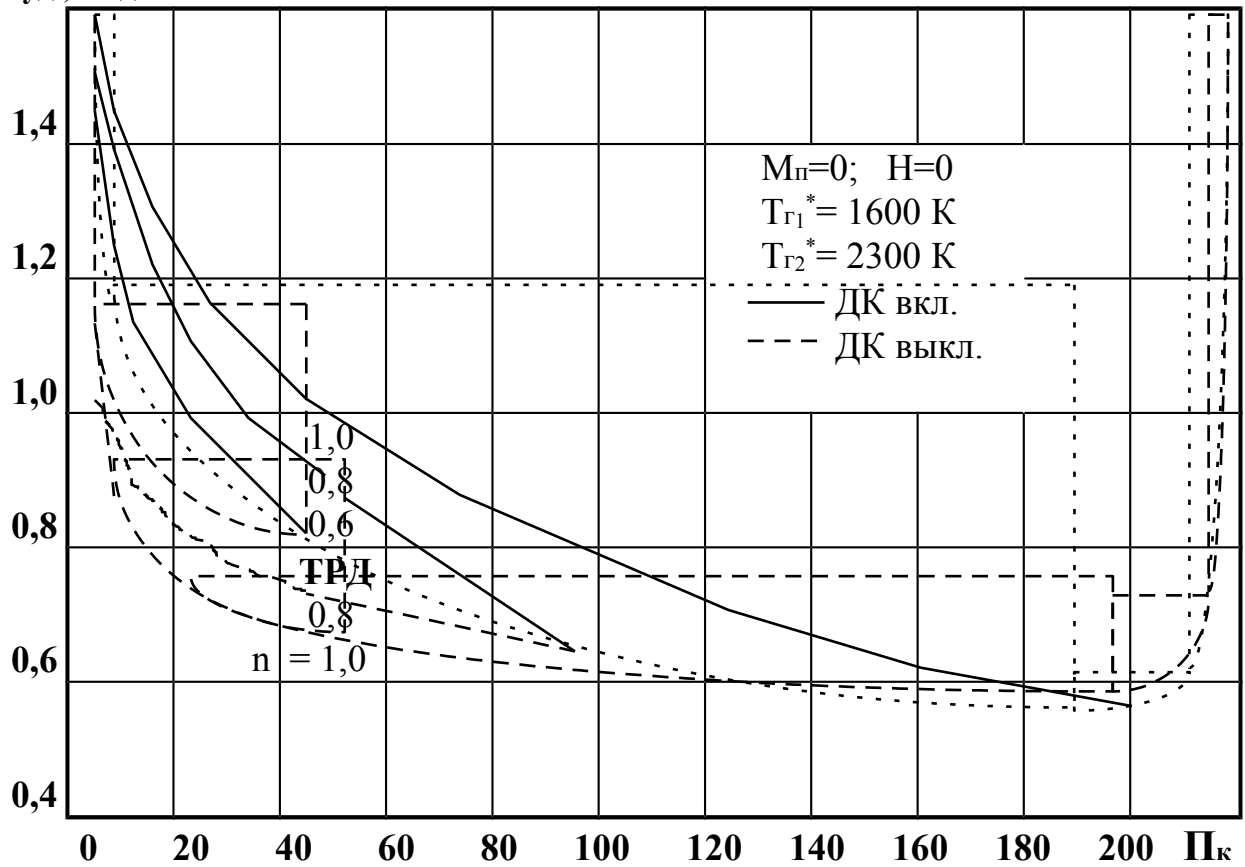


Рис. 3

Влияние коэффициента двухкамерности  $n$  на  $P_{уд}$  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.

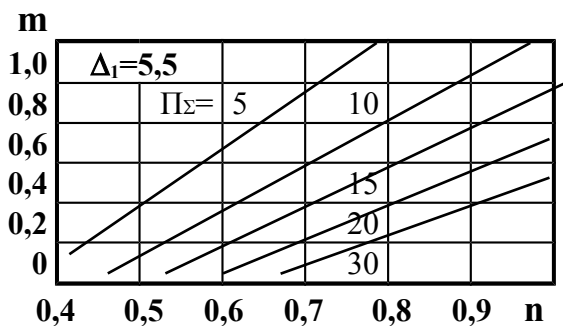


Рис. 4

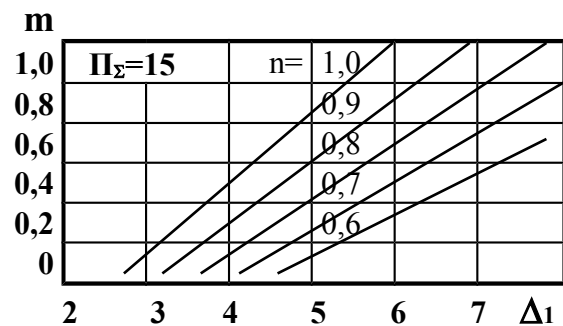


Рис. 5

На рис.4 показано изменение коэффициента двухконтурности  $m$  в зависимости от коэффициента двухкамерности  $n$  для различных степеней повышения давления  $\Pi_\Sigma$  ( $\Delta_1 = 5,5$ ;  $\eta_c = 0,85$ ;  $\eta_p = 0,93$ ). На рис.5 показано изменение коэффициента двухконтурности  $m$  в зависимости от подогрева  $\Delta_1$  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 ( $M_{п=0}$ ;  $H=0$ ).

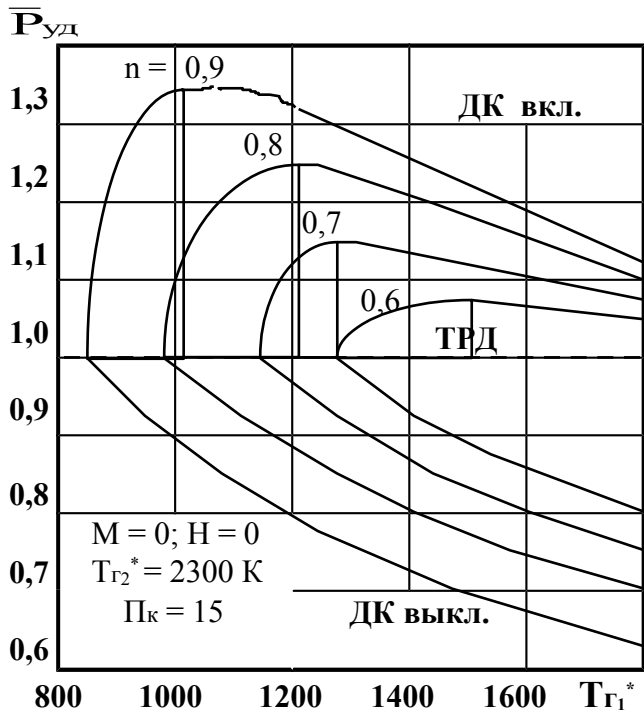


Рис. 6

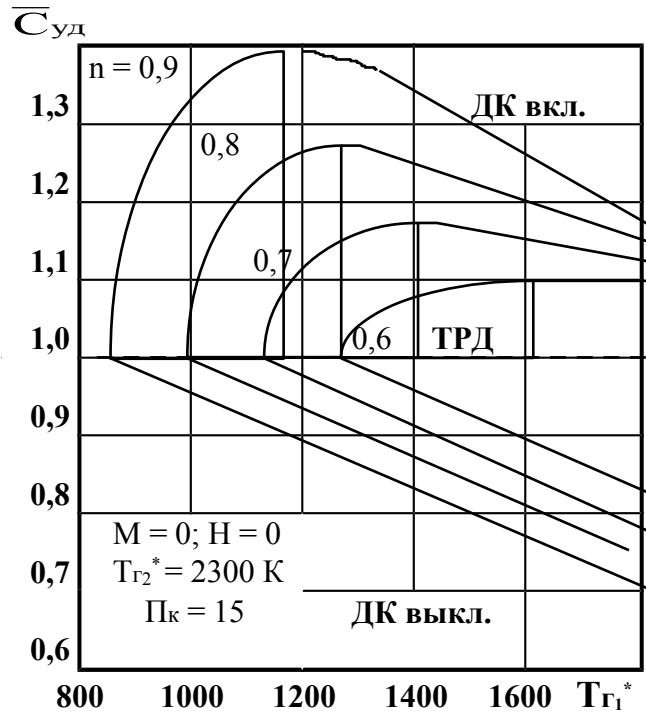


Рис. 7

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  $\Pi_k$  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  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , связанного со снижением

Тн. Выше 11 км (до Н=20 км) температура воздуха Тн почти не меняется и при постоянных значениях Мп и ТГ<sub>1</sub><sup>\*</sup>, ТГ<sub>2</sub><sup>\*</sup> суммарная работа циклов и удельная тяга остаются неизменными.

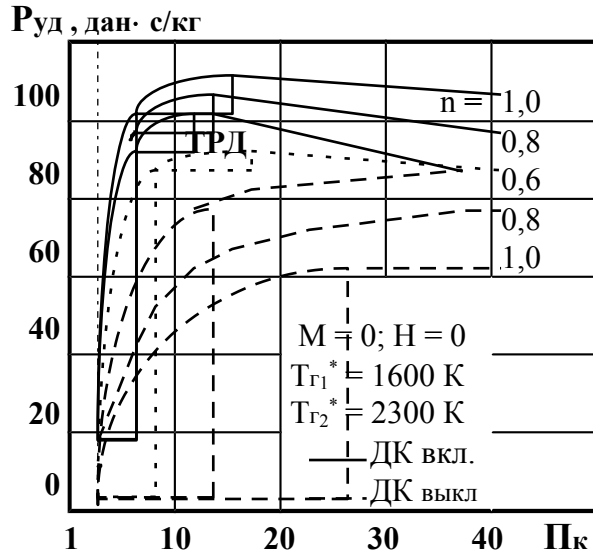


Рис. 8

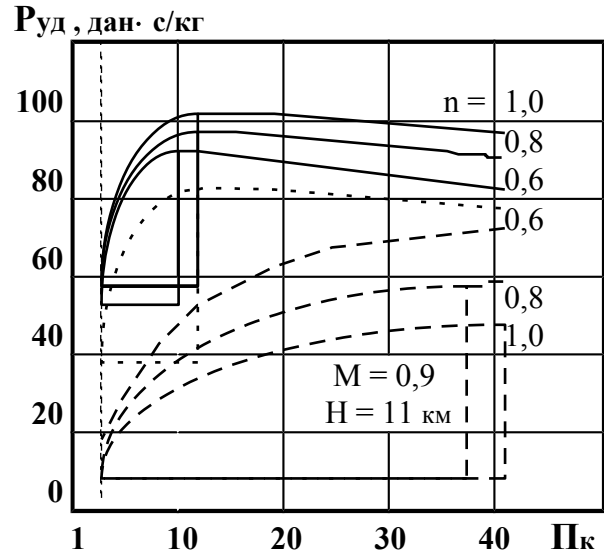


Рис. 9

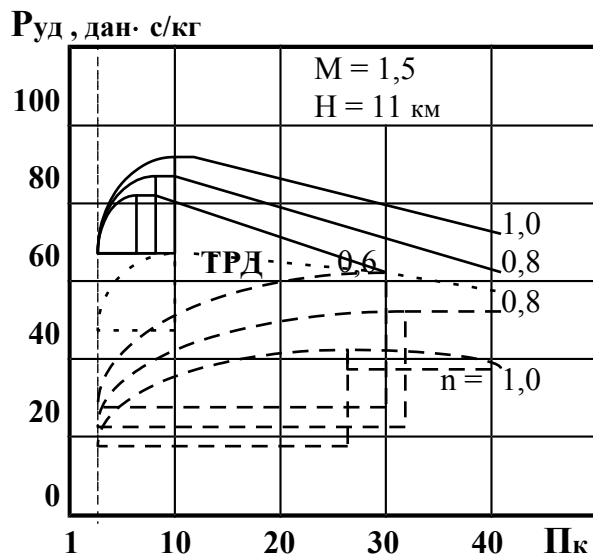


Рис. 10

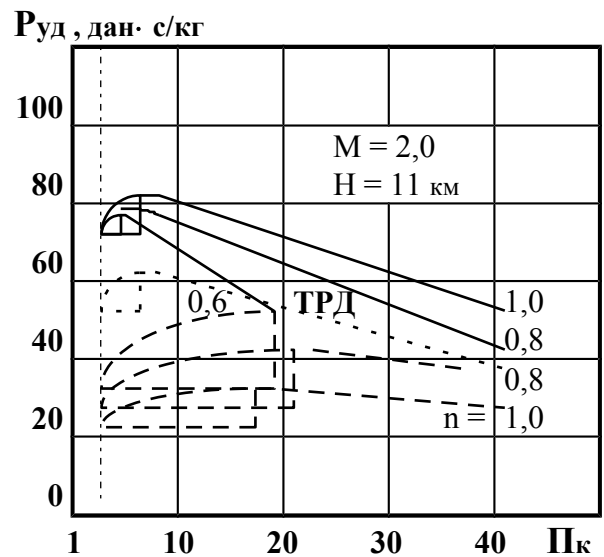


Рис. 11

Изменение  $S_{уд}$  в зависимости от  $Пк$  при различных полетных условиях показано на рис.12÷15. Как видно из этих рисунков, практически при любых сочетаниях  $Mп$  и  $H$  рост  $Пк$  в области ее рабочих значений приводит к уменьшению  $S_{уд}$  из-за роста общего КПД. Рост числа  $Mп$  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  $M_{п} \approx const$  слабо влияет на величину  $S_{уд}$ , так как при этом увеличение  $R_{уд}$  происходит в связи с увеличением  $q_T$ , зависящего от  $T_v^*$  и  $T_k^*$ . 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.

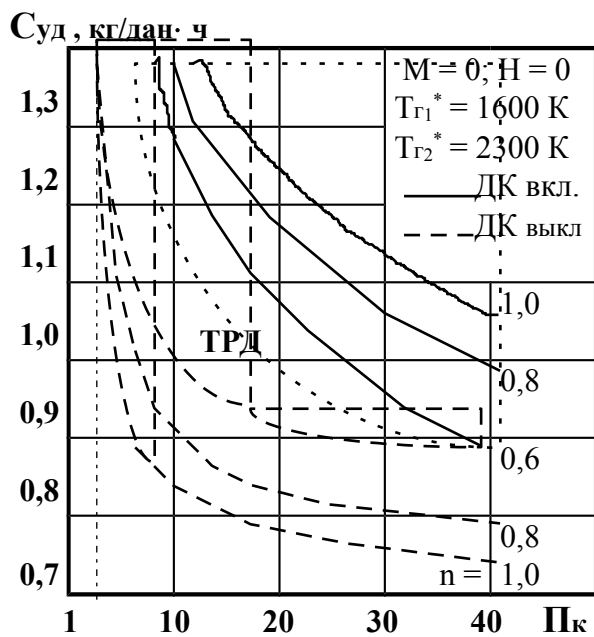


Рис. 12

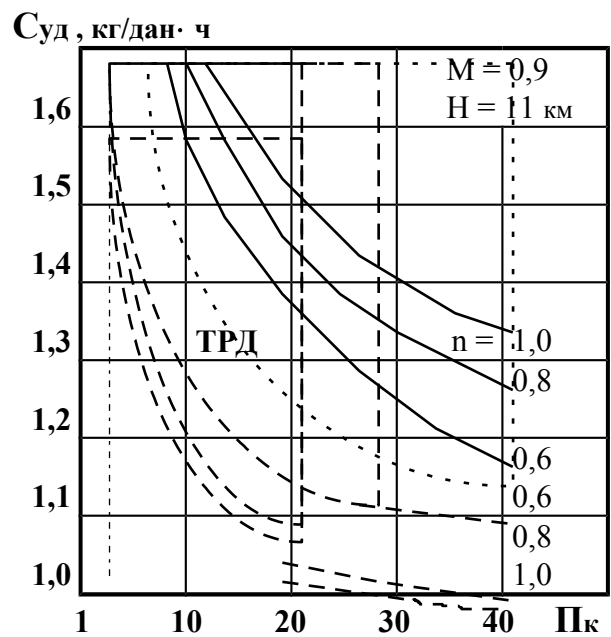
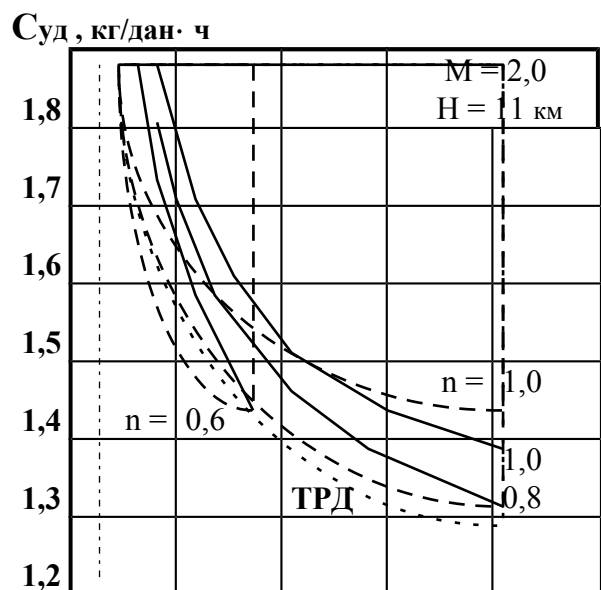
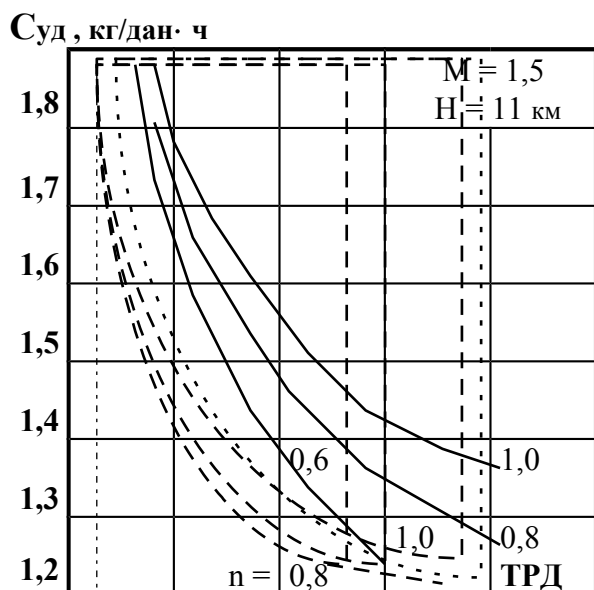


Рис. 13



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 ( $\Pi_{к} = 15; T_{Г2}^* = 2300$  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.

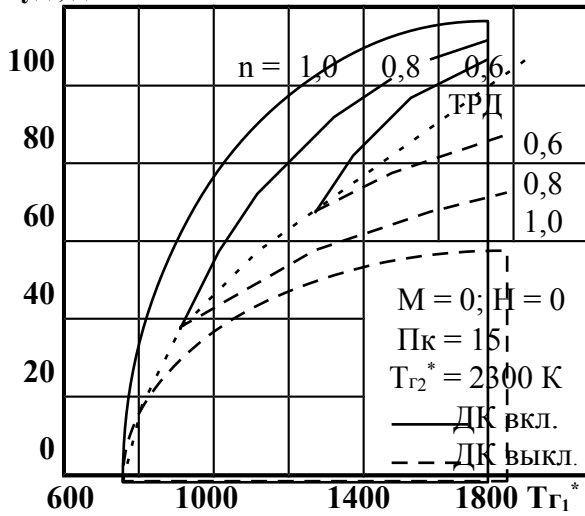
 $R_{уд}$ , дан·с/кг

Рис. 16

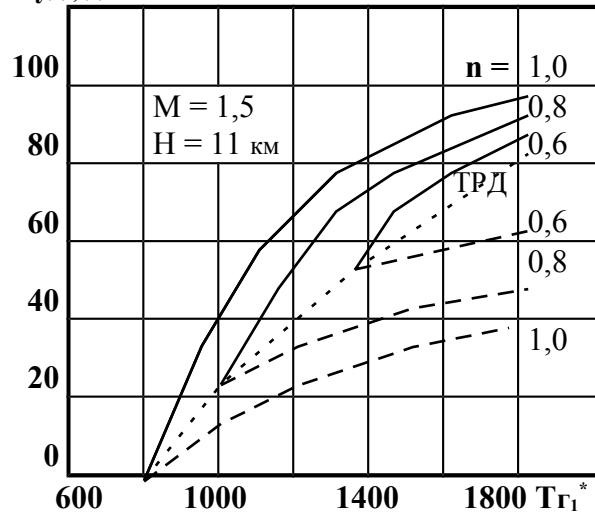
 $R_{уд}$ , дан·с/кг

Рис. 17

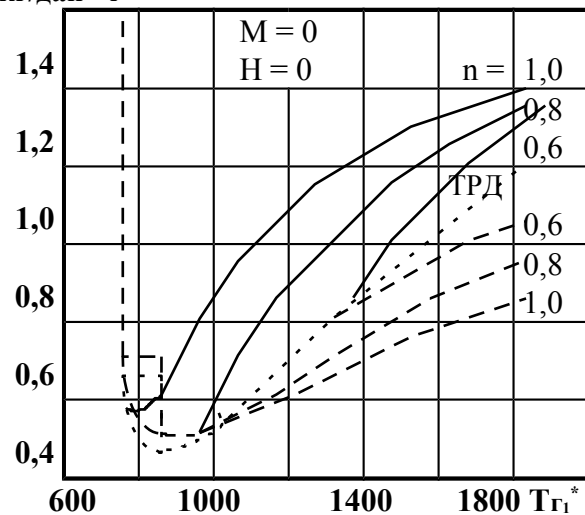
 $S_{уд}$ , кг/дан·ч

Рис. 18

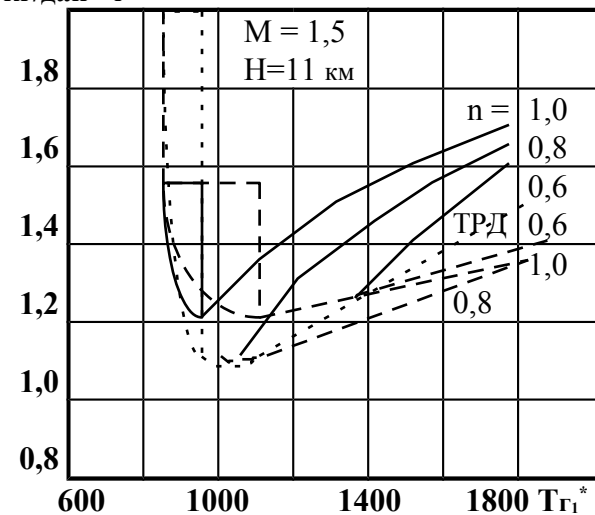
 $S_{уд}$ , кг/дан·ч

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].

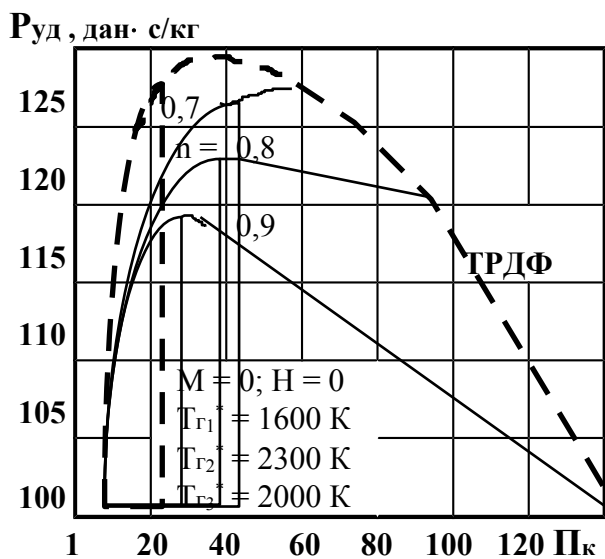


Рис. 20

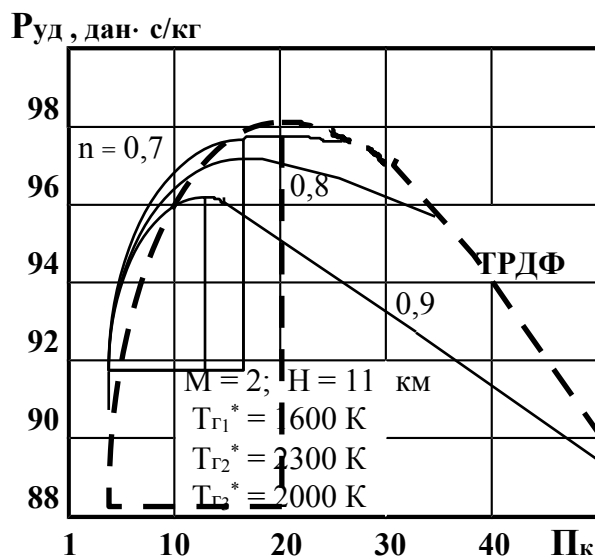
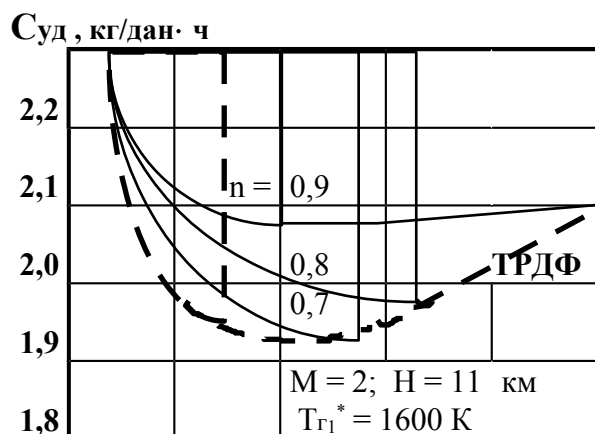
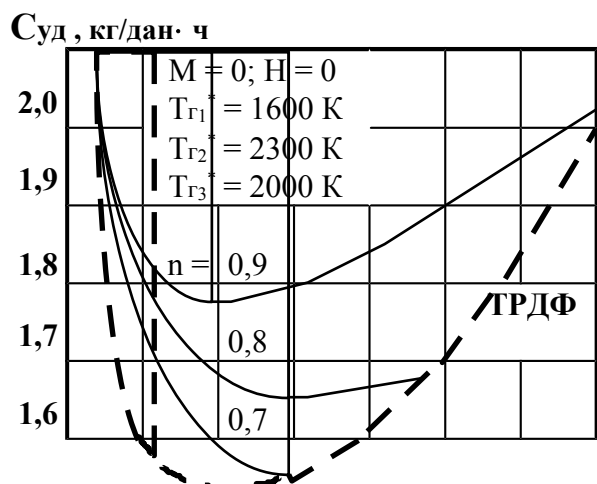


Рис. 21



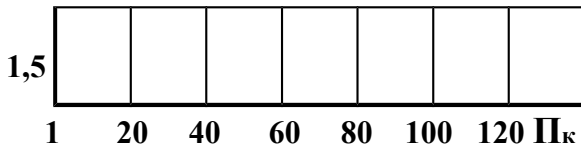


Рис. 22

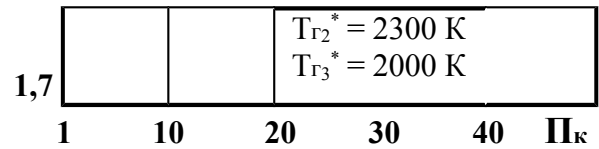


Рис. 23

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.

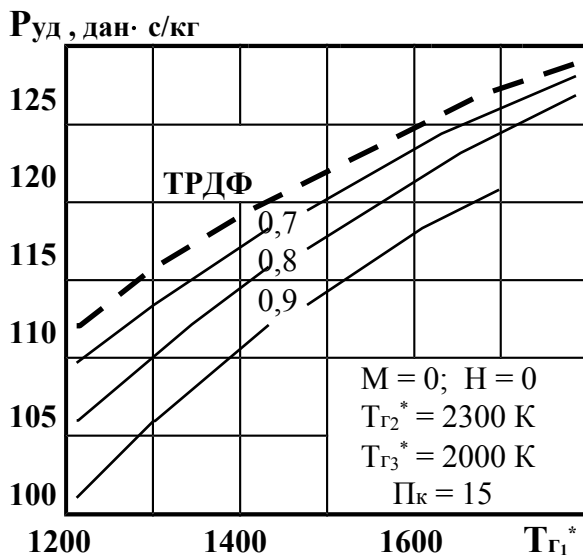


Рис. 24

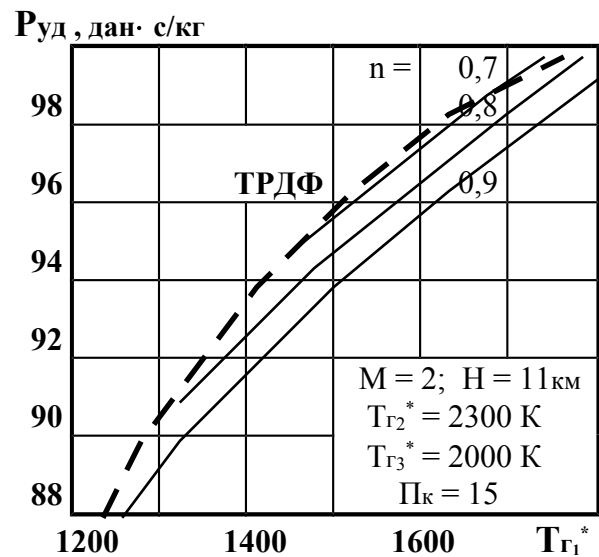
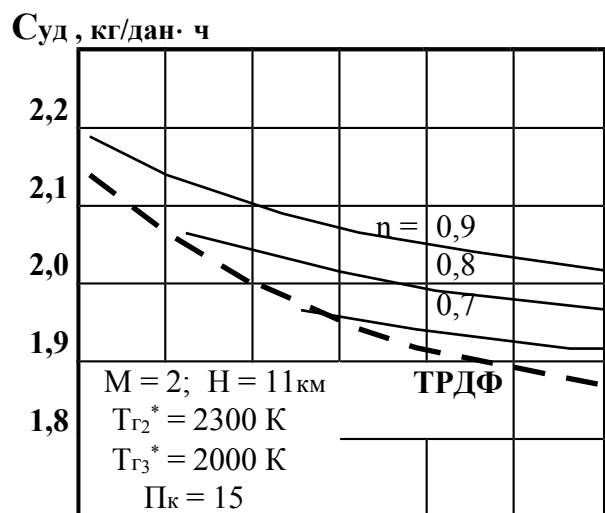
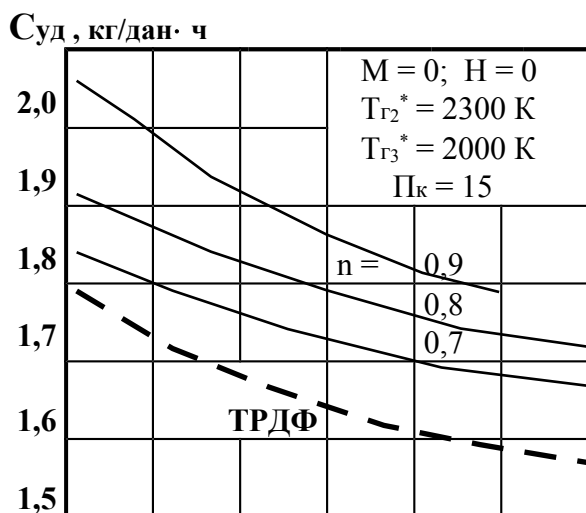


Рис. 25



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.*