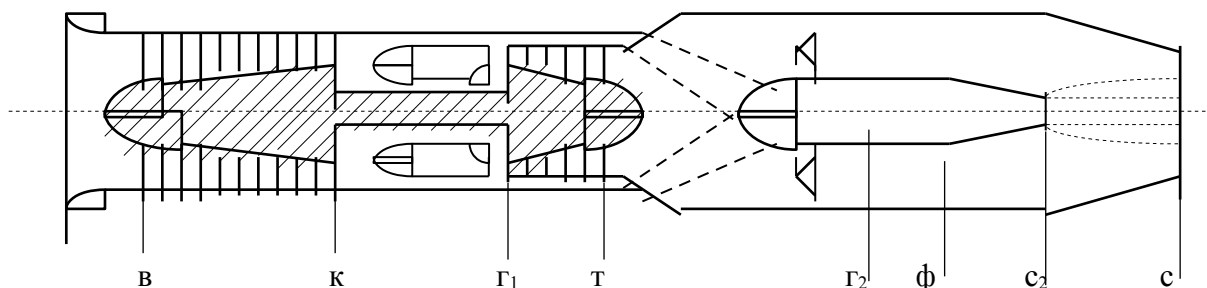


## Исследование термодинамического цикла форсированного двухкамерного турбореактивного двигателя

*В.Л. Письменный*

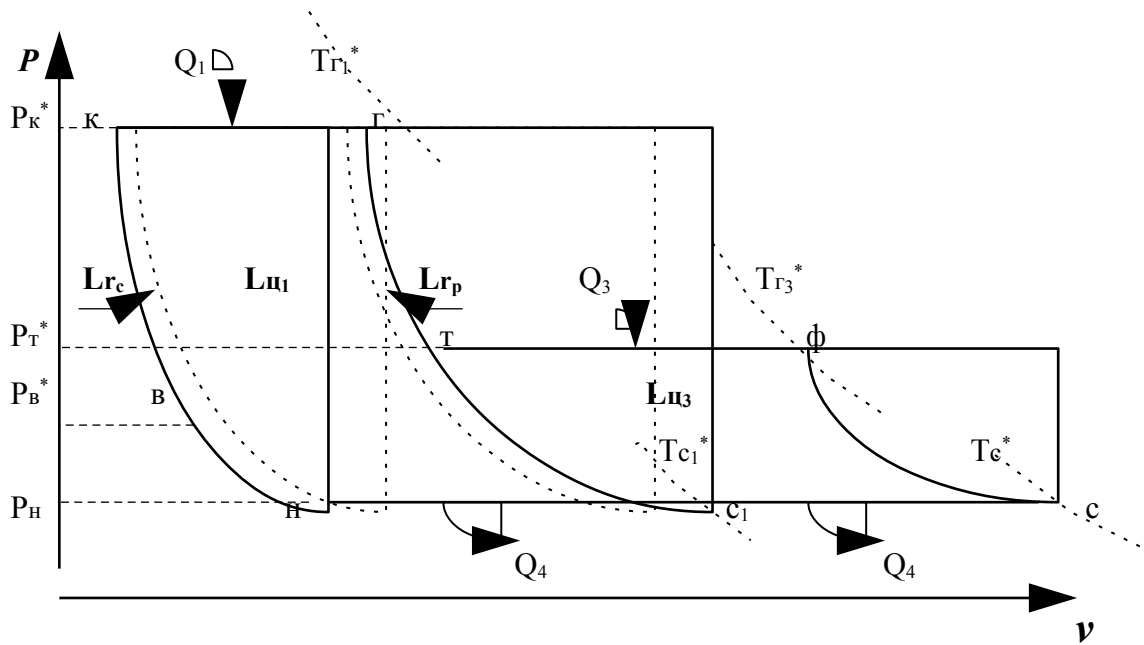
Рассмотрены возможности увеличения тяги двухкамерного турбореактивного двигателя за счет форсирования основного цикла. Дан анализ влияния условий полета летательного аппарата на величину работы форсированного цикла.

Исследование термодинамического цикла двухкамерного турбореактивного двигателя (ТРДК) [1] выполнено в работе [2]. Температура горячего газа в основном цикле ТРДК ограничена жаропрочностью лопаток турбины и, соответственно, меньше температуры горения стехиометрической топливовоздушной смеси. В связи с этим в ТРДК существует возможность форсирования основного цикла за счет сжигания дополнительного топлива за турбиной двигателя (рис.1).

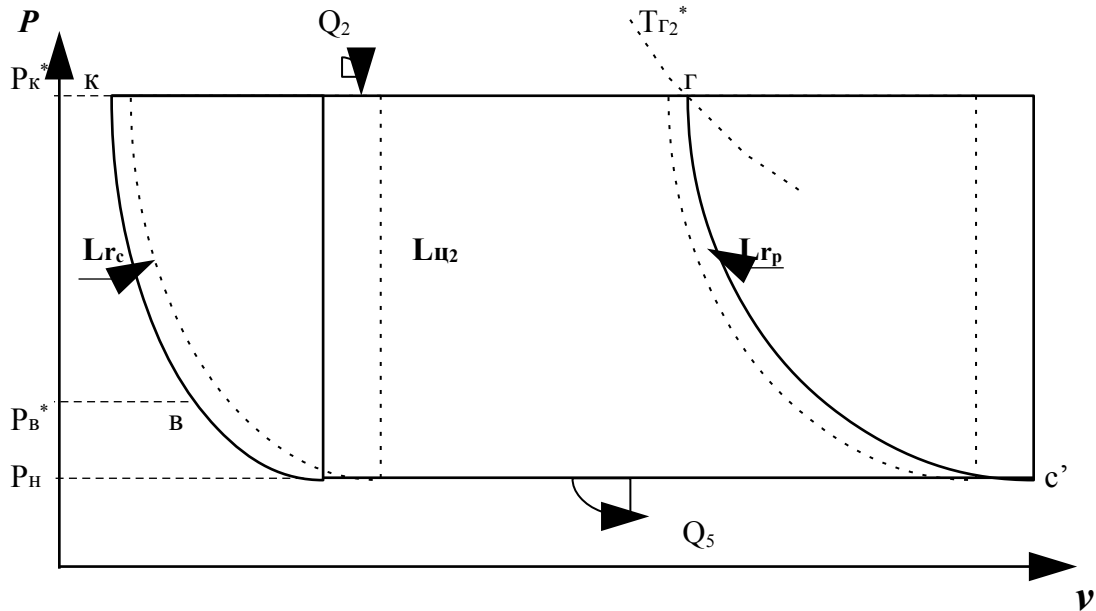


**Рис.1.** Форсированный двухкамерный ТРД

Форсированный двухкамерный турбореактивный двигатель (ТРДКФ) имеет два термодинамических цикла: форсированный (основной) (рис.2,а) и дополнительный (рис.2,б), представленные на рис.2 в  $p-v$  координатах. При этом форсированный цикл (рис.2,а) условно представлен в виде двух отдельных циклов: основного -  $L_{ц1}$  и форсажного -  $L_{ц3}$ .



а)



б)

**Рис.2.** Термодинамические циклы ТРДКФ: а)- форсированный цикл, б) дополнительный цикл

В соответствии с принятым делением форсированного цикла на основной и форсажный будем полагать, что потери сжатия и расширения ( $L_{rc}$  и  $L_{rp}$ , рис.2,а) компенсируются за счет работы основного цикла. В этом случае работа основного цикла, приходящаяся на 1 кг рабочего тела, будет определяться соотношением [3, стр.104]

$$L_{ц1} = c_{pB} \cdot T_H \cdot \frac{(e-1)}{\eta_c} \cdot \left( \frac{\bar{m} \cdot \Delta_1 \cdot \eta_c \cdot \eta_p}{e} - 1 \right), \quad (1)$$

где 
$$e = \Pi_{\Sigma}^{\frac{K-1}{K}},$$

$\Pi_{\Sigma}$  - суммарная степень сжатия,

$$\Delta_1 = \frac{T_{Г1}^*}{T_H} - \text{подогрев газа в основной камере сгорания,}$$

$$\bar{m} = \frac{c_{pГ} \cdot \left(1 - \frac{1}{\Pi_{\Sigma}^{\frac{K-1}{K}}}\right)}{c_{pВ} \cdot \left(1 - \frac{1}{\Pi_{\Sigma}^{\frac{K-1}{K}}}\right)}.$$

Работа форсажного цикла, приходящаяся на 1 кг рабочего тела, будет определяться как

$$L_{ц3} = c_{pГ} \cdot T_{c1}^* \cdot (e_c - 1) \cdot \left(\frac{T_{Г3}^*}{T_{c1}^* \cdot e_c} - 1\right),$$

где 
$$e_c = \Pi_c^{\frac{K-1}{K}}.$$

Полагая, что  $T_{c1}^* = \frac{T_{Г1}^*}{e}$ , а  $c_{pГ} = \bar{m} \cdot c_{pВ}$ , получаем

$$L_{ц3} = \bar{m} \cdot c_{pВ} \cdot T_{Г1}^* \cdot \frac{(e_c - 1)}{e} \cdot \left(\frac{T_{Г3}^* \cdot e}{T_{Г1}^* \cdot e_c} - 1\right)$$

или, после несложных преобразований, получаем

$$L_{ц3} = c_{pВ} \cdot T_H \cdot \frac{\bar{m} \cdot (e - e_T) \cdot (\Delta_3 \cdot e_T - \Delta_1)}{e \cdot e_T}, \quad (2)$$

где 
$$\Delta_3 = \frac{T_{Г3}^*}{T_H} - \text{подогрев газа в форсажной камере,}$$

$$e_T = \Pi_T^{\frac{K-1}{K}}.$$

Работа дополнительного цикла, приходящаяся на 1 кг рабочего тела, определяется как

$$L_{ц2} = c_{pВ} \cdot T_H \cdot \frac{(e - 1)}{\eta_c} \cdot \left(\frac{\bar{m} \cdot \Delta_2 \cdot \eta_c \cdot \eta_p}{e} - 1\right), \quad (3)$$

где 
$$\Delta_2 = \frac{T_{Г2}^*}{T_H} - \text{подогрев газа в дополнительной камере сгорания.}$$

При этом степень понижения давления на турбине, выраженная через  $e_T$ , определяется (при известных  $\Pi_{\Sigma}$  и  $\Pi_V$ ) через коэффициент двухкамерности [2] как

$$e_{\tau} = \frac{e}{e \cdot (1 - n) + e_v \cdot n}, \quad (4)$$

где  $e_v = \Pi_v^{\frac{\kappa-1}{\kappa}},$

$$n = \frac{1 - 1/e_{\tau}}{1 - 1/e_{\kappa}} - \text{коэффициент двухкамерности [2].}$$

Подогрев газа  $\Delta_3$  в форсажной камере определяется в соответствии с режимом работы двигателя, который при этом, как правило, является предельным. Дело в том, что использование форсажа в двухкамерных ТРД (из-за пониженных термических КПД) оправдано только в тех случаях, когда требуется получить предельную тягу двигателя, а энергетические возможности основной и дополнительной камер сгорания уже исчерпаны, что соответствует условию:

$$T_{\Gamma 1}^* = T_{\Gamma 1}^*_{\max}; \quad \alpha_{\text{фк}} \equiv \alpha_{\text{дк}} \equiv \alpha_{\text{min}} \quad (5)$$

Определим, используя условие (5), подогревы газа в основной, дополнительной и форсажной камерах сгорания.

Подогрев в дополнительной камере сгорания может быть определен с использованием условной теплоемкости [3] по формуле

$$\Delta_2 = e + \frac{Hu \cdot \eta_{\Gamma}}{\alpha_{\text{дк}} \cdot L_o \cdot c_{\text{п}} \cdot T_{\text{н}}},$$

где  $Hu$  - теплотворная способность топлива,  
 $\eta_{\Gamma}$  - коэффициент полноты сгорания,  
 $\alpha_{\text{дк}}$  - коэффициент избытка воздуха в дополнительной камере сгорания,  
 $L_o$  - стехиометрический коэффициент,  
 $c_{\text{п}}$  - условная теплоемкость.

Условная теплоемкость определяется по аппроксимирующей формуле [3]:

$$c_{\text{п}} = 0,878 + 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{н}} \cdot (\Delta_2 + 0,48 \cdot e) \quad [\text{кЖд/кг} \cdot \text{К}].$$

Подогрев газа в форсажной камере определяется из уравнения энергии:

$$Q_1 + Q_2 = \dot{I}_{\Gamma 3}^* - \dot{I}_{\text{в}}^* + (L_{\Gamma} - L_{\text{к}}), \quad (6)$$

где  $Q_1, Q_3$  - теплота, подводимая к 1 кг рабочего тела, в основном и форсажном циклах соответственно (рис.2,а);

$\dot{I}_{\Gamma 3}^*, \dot{I}_{\text{в}}^*$  - полная энтальпия в форсажной камере и на входе в двигатель,

соответственно;

$L_T, L_K$  - работа, приходящаяся на 1 кг рабочего тела, турбины и компрессора, соответственно.

В развернутом виде соотношение (6) записывается как

$$Hu \cdot \eta_r \cdot q_{Tфк} = c_{p1} \cdot (T_{Г3}^* - T_{В}^*) + c_{p2} \cdot (T_{Г1}^* - T_{Т}^*) - c_{p3} \cdot (T_{К}^* - T_{В}^*),$$

где  $c_{pi}$  - средние теплоемкости в соответствующих интервалах температур;

$q_{Tфк}$  - относительный расход топлива в форсажной камере сгорания.

Полагая  $c_{pi} \approx c_{п}$  и имея в виду, что  $q_{Tфк} = \frac{1}{\alpha_{фк} \cdot L_o}$ , получаем

$$T_{Г3}^* = T_{К}^* + \frac{Hu \cdot \eta_r}{\alpha_{фк} \cdot L_o \cdot c_{п}} - (T_{Г1}^* - T_{Т}^*) \cdot Kc_p,$$

где  $Kc_p$  - коэффициент, учитывающий погрешность принятого допущения:  $c_{pi} \approx c_{п}$ .

В соответствии с уравнением Бернулли для газовых турбин:

$$T_{Г1}^* - T_{Т}^* = T_{Г1}^* \cdot \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \eta_p,$$

откуда  $T_{Г3}^* = T_{К}^* + \frac{Hu \cdot \eta_r}{\alpha_{фк} \cdot L_o \cdot c_{п}} - T_{Г1}^* \cdot \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \eta_p \cdot Kc_p$

или, после деления на  $T_H$ ,

$$\Delta_3 = e + \frac{Hu \cdot \eta_r}{\alpha_{фк} \cdot L_o \cdot c_{п} \cdot T_H} - \Delta_1 \cdot \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \eta_p \cdot Kc_p.$$

При условии  $\alpha_{фк} = \alpha_{дк}$ , соответственно:

$$\Delta_3 = \Delta_2 - \Delta_1 \cdot \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \eta_p \cdot Kc_p. \quad (7)$$

Для нахождения  $Kc_p$  выполним идентификацию полученного соотношения. Воспользуемся известной формулой для определения подогрева газа в форсажной камере ТРДФ [3, стр.82]

$$\Delta_{ф} = e_v + \frac{Hu \cdot \eta_r}{\alpha_{фк} \cdot L_o \cdot c_{п} \cdot T_H}. \quad (8)$$

В соответствии с [2] двухкамерный ТРДФ вырождается в ТРДФ при  $n = \frac{e}{\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p \cdot \Delta_1}$ , что

соответствует  $e_T = \frac{\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p \cdot \Delta_1}{\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p \cdot \Delta_1 - e + e_v}$  (см. 4). Тогда в соответствии с (7) подогрев в форсажной камере ТРДФ может быть определен как

$$\Delta_\Phi = e + \frac{Hu \cdot \eta_T}{\alpha_{фк} \cdot L_o \cdot C_\Pi \cdot T_H} - \frac{e - e_v}{\bar{m} \cdot \eta_c} \cdot K_{c_p}.$$

(9)

Приравняв (8) и (9), получаем  $K_{c_p} = \bar{m} \cdot \eta_c$ . После подстановки  $K_{c_p}$  в (7) окончательно получаем

$$\Delta_3 = \Delta_2 - \Delta_1 \cdot \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p$$

или в относительных величинах

$$\bar{\Delta}_3 = \bar{\Delta}_2 - \frac{e_T - 1}{e_T} \cdot \bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p,$$

где  $\bar{\Delta}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ ;  $\bar{\Delta}_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta_1}$ .

Таким образом, видно, что на форсированном режиме ( $\alpha_{фк} = \alpha_{дк}$ ) соотношение подогревов в камерах сгорания ТРДК зависит от степени понижения давления на турбине, которая в свою очередь зависит от коэффициента двухкамерности двигателя и скорости полета [2].

На рис.3 показано соотношение подогревов газа в камерах сгорания ТРДК на форсированном режиме в зависимости от  $\Pi_T$  двигателя ( $\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p = 0,8$ ). Как видно

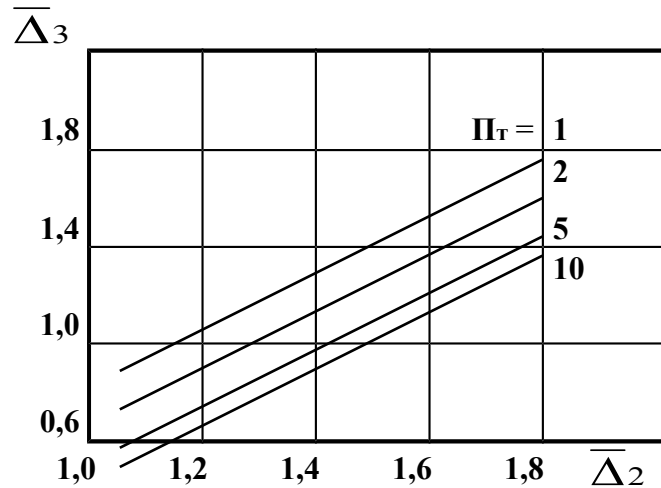


Рис. 3

из рис.3 повышение  $\Pi_T$ , которое имеет место при увеличении коэффициента двухкамерности, приводит к понижению подогрева в форсажной камере сгорания при неизменном режиме ее работы ( $\alpha_{фк} \approx \text{const}$ ), что объясняется передачей энергии посредством компрессора из одного контура двигателя в другой. **В связи с этим предельная температура газа в форсажной камере сгорания ТРДК всегда ниже предельной температуры газа в форсажной камере ТРДФ, а предельная**

**температура газа в дополнительной камере сгорания ТРДК всегда выше предельной температуры газа в форсажных камерах ТРДК и ТРДФ.**

Суммарная работа циклов форсированного ТРДК, приходящаяся на 1 кг рабочего тела, определяется на основе соотношений (1), (2), 3) как

$$Le_{\phi} = \frac{L_{ц1} + L_{ц3} + m \cdot L_{ц2}}{1 + m}$$

где 
$$m = \frac{n \cdot \bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p \cdot \Delta_1 - e}{e}$$
 - коэффициент двухконтурности [2].

На рис.4 показано изменение  $Le_{\phi_{np}} = Le_{\phi} / (C_{pв} \cdot T_n)$  от  $P_{\Sigma}$  и  $n$  при  $\Delta_1=5,5$  и  $\alpha_{фк}=1,1$  ( $\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p = 0,8$ ) в стартовых условиях. На рис.5 показано изменение  $Le_{\phi_{np}}$  от  $P_{\Sigma}$  и  $n$  при  $\Delta_1=5,5$  и  $\alpha_{фк}=1,1$  ( $\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p = 0,8$ ) в полетных условиях ( $M_{п}=2$ ;  $H = 0$ ).

$L_{e_{np}}$

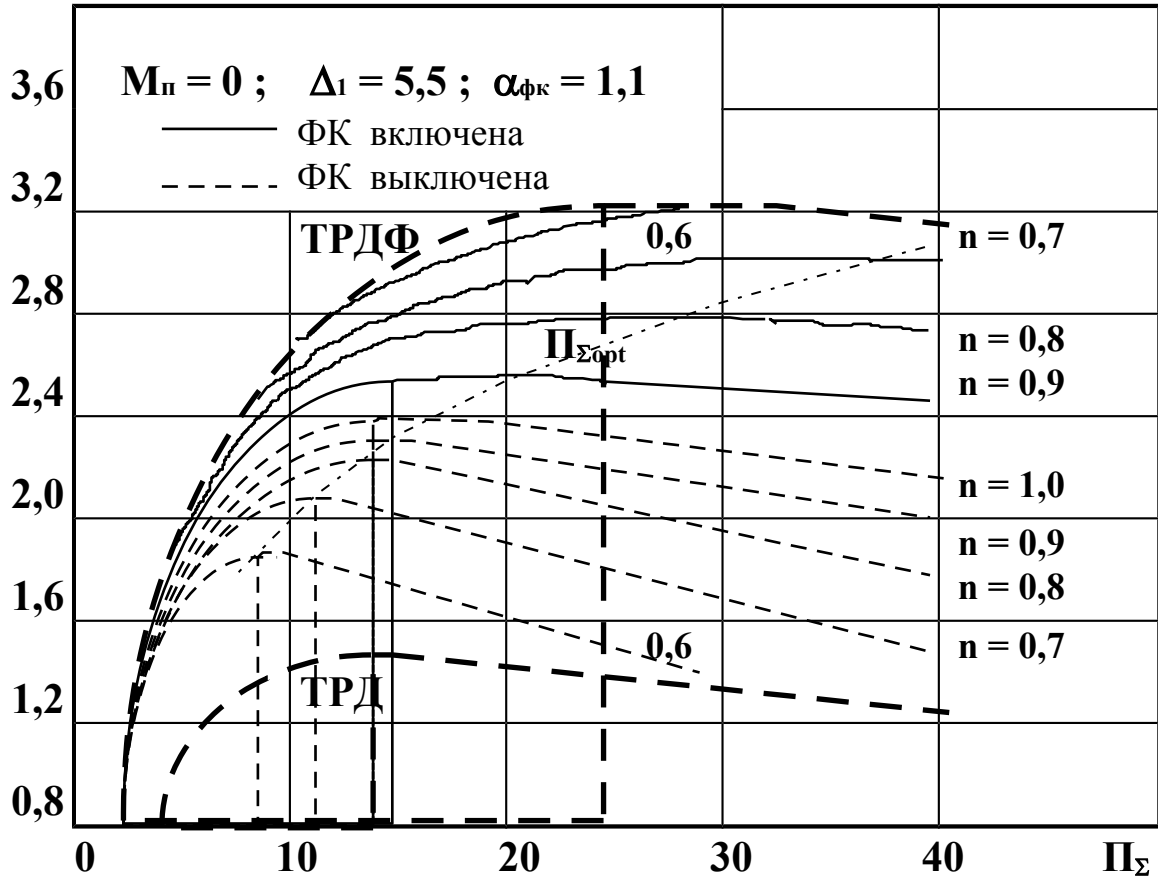
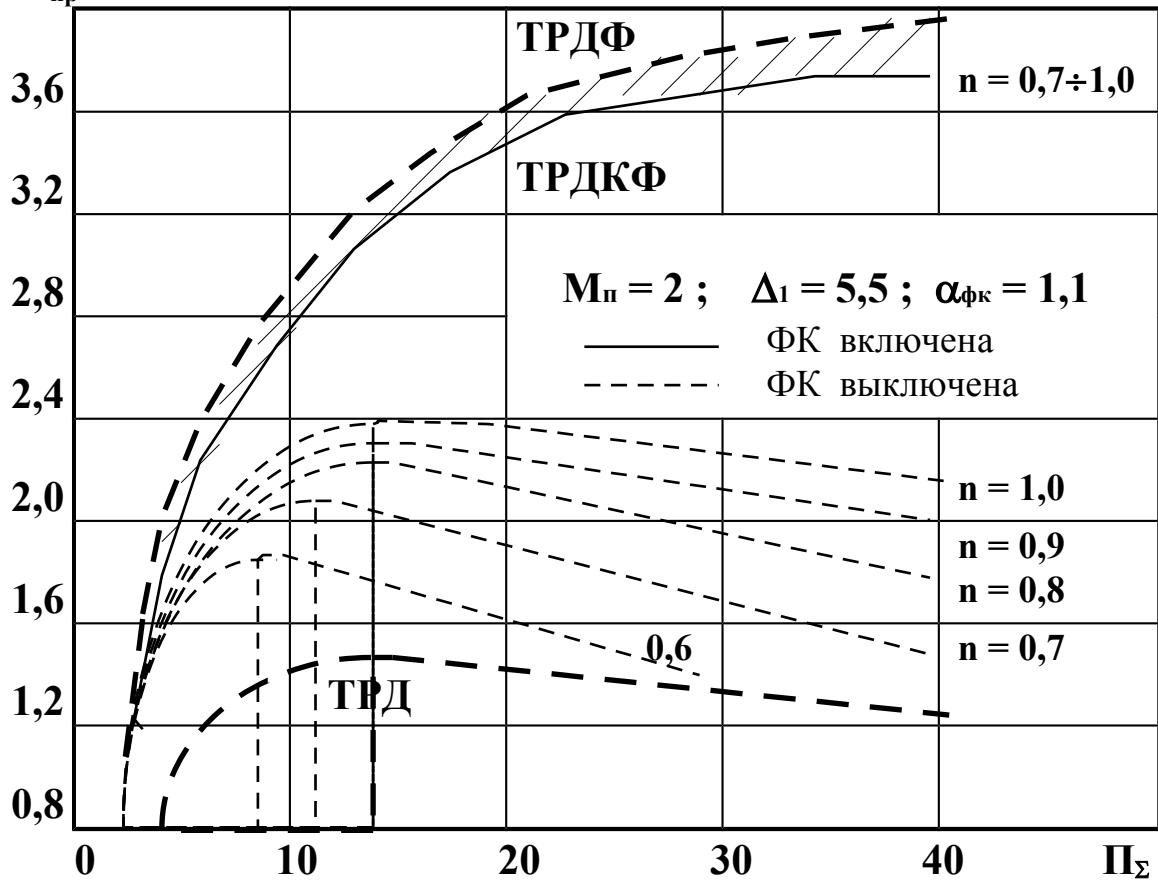


Рис. 4

$L_{e_{np}}$





**Рис. 5**

Из рис.4, 5 видно:

1. Уменьшение коэффициента двухкамерности приводит к увеличению приведенной работы  $Le_{фпр}$  форсированного двигателя, которая достигает своего максимального значения при  $n=n_{min}$ , т.е. при вырождении ТРДК. Откуда следует весьма важный вывод: **работа циклов ТРДКФ при прочих равных условиях меньше работы циклов ТРДФ**. Данная закономерность объясняется тем, что коэффициент двухкамерности влияет на приведенную работу форсажного цикла и не влияет на приведенную работу основного и дополнительного циклов. Поэтому изменение суммарной работы, в конечном счете, несмотря на изменение соотношения долей работ циклов, определяется величиной работы форсажного цикла, которая при уменьшении  $n$  увеличивается.
2. Уменьшение коэффициента двухкамерности сопровождается повышением  $\Pi_{\Sigma opt}$ , что объясняется увеличением доли работы форсажного цикла, имеющего более высокие  $\Pi_{\Sigma opt}$ , в суммарной работе.
3. При больших скоростях полета суммарная работа циклов ТРДКФ, независимо от коэффициента двухкамерности, **приближается к работе циклов ТРДФ**, что объясняется преобладающим влиянием  $\Pi_v$  на работу форсажного цикла.

На рис.6 показано изменение работы циклов ТРДКФ в зависимости от скорости полета и коэффициента двухкамерности при фиксированном подогреве  $\Delta_1=5,5$  и  $\Pi_{\Sigma}=\Pi_{\Sigma opt}$  на высоте 11 км. Здесь же, для сравнения, показана аналогичная характеристика ТРДФ, имеющего те же параметры рабочего процесса. Видно, что на скоростях  $M_p > 1,5$  работы циклов ТРДКФ и ТРДФ существенно сближаются и, соответственно, стираются различия в характеристиках сравниваемых схем.

На рис.7 показано изменение степени повышения работы циклов форсированного двигателя в зависимости от высоты и скорости полета при  $\Delta_1 = 5,5$ ;  $\alpha_{фк}=1,1$  и  $n = 0,8$  ( $\bar{m} \cdot \eta_c \cdot \eta_p = 0,8$ ). Видно, что степень повышения работы циклов составляет  $Le_{ф}/Le = 1,2 \div 1,7$ , увеличиваясь с увеличением высоты (до 11 км) и скорости полета.

Сравним КПД циклов ТРДКФ и ТРДФ при одинаковых параметрах  $\Pi_{\Sigma}$ ,  $T_{Г1}^*$ ,  $\alpha_{фк}$ . В общем случае КПД циклов определяется как

$$\eta_e = \frac{Le}{Q},$$

где  $Le$  - работа циклов, приходящаяся на 1 кг рабочего тела,

$Q$  - теплота, подведенная к 1 кг рабочего тела.

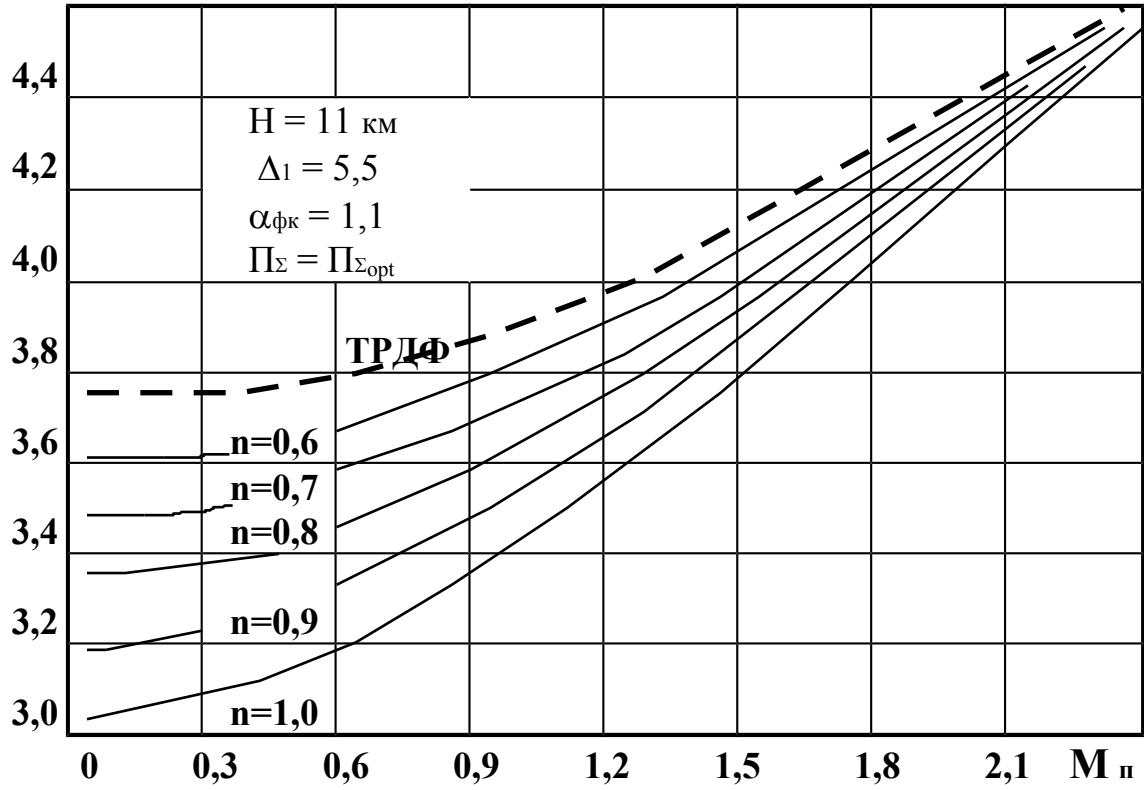
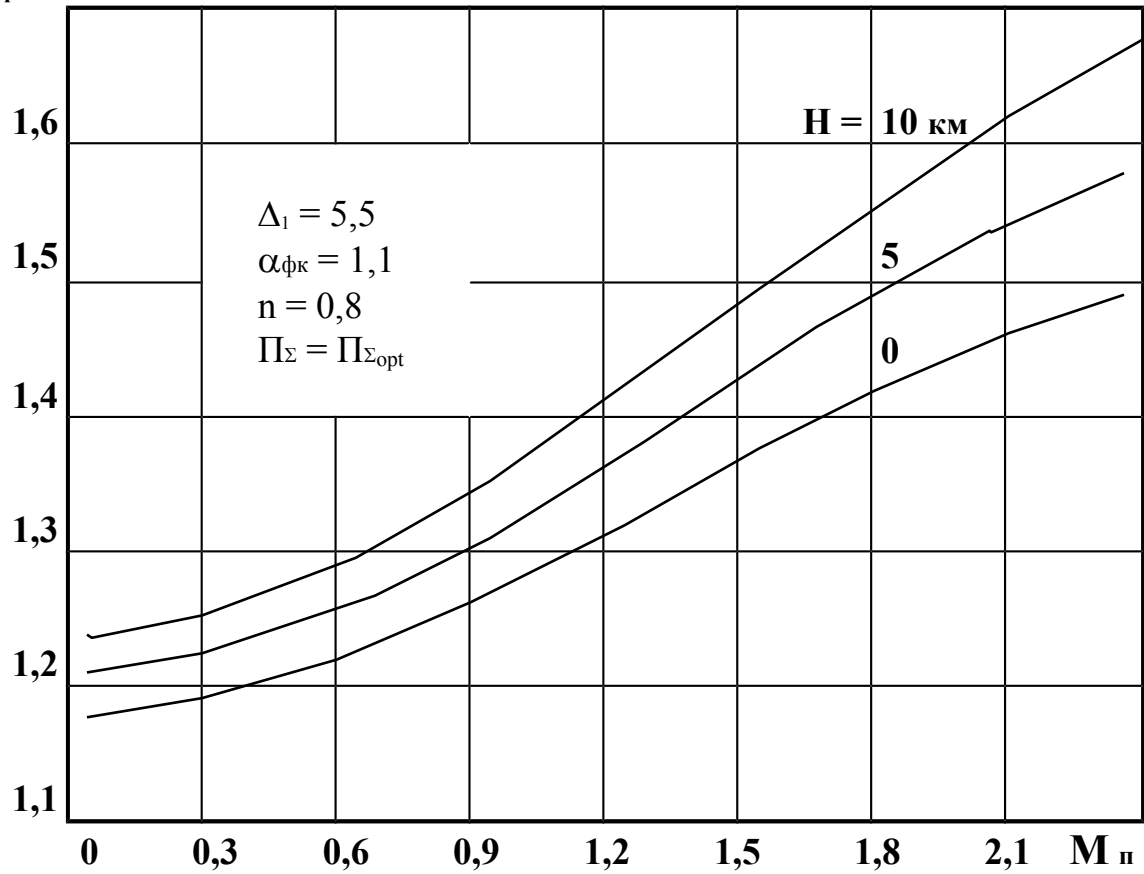
$Le_{\phi_{np}}$ 

Рис. 6

 $Le_{\phi}/Le$ 

**Рис. 7**

Для форсированных двигателей (независимо от схемы) количество теплоты, подведенное к

1 кг рабочего тела, определяется известным соотношением [3]  $Q = \frac{Hu \cdot \eta_r}{L_o \cdot \alpha_{фк}}$ , что при  $\alpha_{фк} = \text{const}$

соответствует  $Q_{фк} = \text{const}$ . Откуда, учитывая, что  $Le_{\text{ТРДКФ}} < Le_{\text{ТРДФ}}$  получаем

$$\eta_{\text{ТРДКФ}} < \eta_{\text{ТРДФ}}$$

**Вывод:** Эффективный КПД двухкамерного ТРДФ меньше эффективного КПД аналогичного ТРДФ.

На рис.8 показано изменение эффективного КПД ТРДКФ в зависимости от коэффициента двухкамерности и скорости полета, полученное для  $T_H=288 \text{ K}$ ,  $\eta_c = 0,83$ ,  $\eta_p = 0,93$ . Видно, что эффективный КПД ТРДКФ меньше эффективного КПД ТРДФ. При этом отличие в значениях КПД в среднем составляет 10÷15% в стартовых условиях и 1÷3% в полетных ( $M_{п} > 1,5$ ). Откуда следует вывод, что применение форсажных режимов в двухкамерных ТРД целесообразно на скоростях  $M_{п} > 1,5$ , что

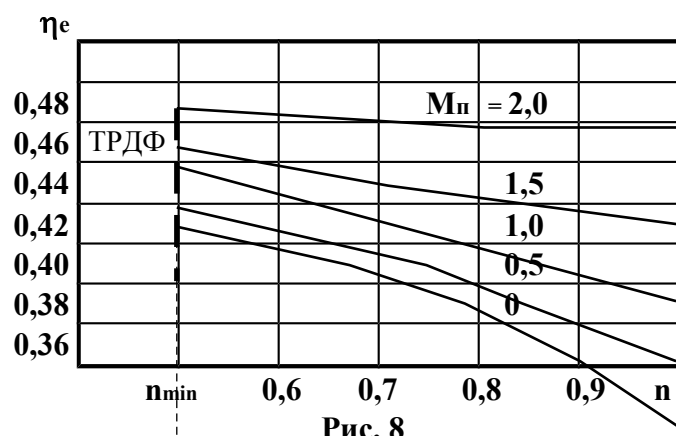


Рис. 8

соответствует фактическим потребностям летательного аппарата.

Таким образом, при сопоставлении циклов форсированных и нефорсированных ТРДК и ТРД можно сделать следующие выводы:

1. При фиксированной температуре газа перед турбиной дополнительный подвод теплоты в форсажной камере сгорания увеличивает суммарную работу циклов ТРДК. Для достигнутых в настоящее время температур  $T_{Г1}^*$  увеличение работы в стартовых условиях составляет  $Le_{ф}/Le = 1,2 \div 1,3$ . В полетных условиях работа циклов ТРДКФ возрастает в большей степени (на сверхзвуковых скоростях  $Le_{ф}/Le = 1,5 \div 1,7$ ).
2. С увеличением доли теплоты, подводимой к рабочему телу в форсажной камере, (уменьшение коэффициента двухкамерности) суммарная работа и КПД циклов ТРДКФ увеличиваются, **приближаясь к соответствующим параметрам ТРДФ.**
3. Оптимальная степень повышения давления форсированного ТРДК всегда выше оптимальной степени повышения давления нефорсированного ТРДК и возрастает при уменьшении коэффициента двухкамерности, увеличении скорости полета.
4. На больших сверхзвуковых скоростях полета ( $M_{п} > 2$ ) характеристики форсированного ТРДК приближаются (независимо от коэффициента двухкамерности) к характеристикам ТРДФ.

### Список литературы

1. Двухкамерный турбореактивный двигатель. Заявка на изобретение № 2000104340 от 21.02.2000, МПК F02 К 3/04 / В.Л.Письменный / ФИПС (положительное решение от 03.01.2002 г.)
  2. Письменный В.Л. Исследование термодинамического цикла двухкамерного турбореактивного двигателя. Электронный журнал “Труды МАИ” №6, 27.11.2001 г.
  3. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч.2. Москва, Машиностроение, 1978 г., 336 с.
- 

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

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