



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок  
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

## Глава 8. Анализ основных характеристик ТРДД

### **§ 8.3. Анализ климатических характеристик**

## Задание

Проанализируйте климатические характеристики двухвального ТРДД при  $n_{\text{вд}} = \text{const}$ .

## Определение

Климатическими характеристиками ТРДД называют зависимости тяги, удельного расхода топлива, расхода воздуха, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях и других параметров двигателя от давления  $p_{\text{Н}}$  и температуры атмосферного воздуха  $T_{\text{Н}}$  на постоянном режиме работы двигателя и при неизменных высоте  $H_{\text{п}} = \text{const}$  и скорости полета  $M_{\text{п}} = \text{const}$ .

**Схема двигателя** (см. § 8.2.)

**Допущения** (см. § 8.2.)

## Анализ

### Влияние $p_H$ .

Пусть давление атмосферного воздуха увеличивается  $p_H \uparrow$  при  $n_{вд} = \text{const}$ ,  $H_{п} = \text{const}$ ,  $T_H = \text{const}$ ,  $M_{п} = \text{const}$ .

Полное давление набегающего потока рабочего тела перед двигателем возрастает при неизменных полной температуре набегающего потока и степени повышения давления от скоростного напора набегающего потока:

$$p_H^* \uparrow \sim p_H \uparrow, T_H^* = \text{const}, \pi_V = \text{const}.$$

Приведенная частота вращения ротора ВД сохраняется постоянной:

$$n_{\text{ВД.пр}} = n_{\text{ВД}} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\text{H}}^*}} = \text{const} .$$

При изменении только  $p_{\text{H}}$  два критерия подобия  $M_{\text{П}}$  и  $n_{\text{ВД.пр}}$  постоянны, следовательно режимы двигателя остаются подобными, а положение рабочих точек на характеристиках всех узлов, относительные и приведенные параметры турбокомпрессора, входного устройства, сопел и двигателя в целом сохраняются неизменными.

$p_T$  на лср на хар . квд = const ;

$\pi_{\text{квд}}^* = \text{const} ;$

$q(\lambda_{\text{ВВД}}) = \text{const} ;$

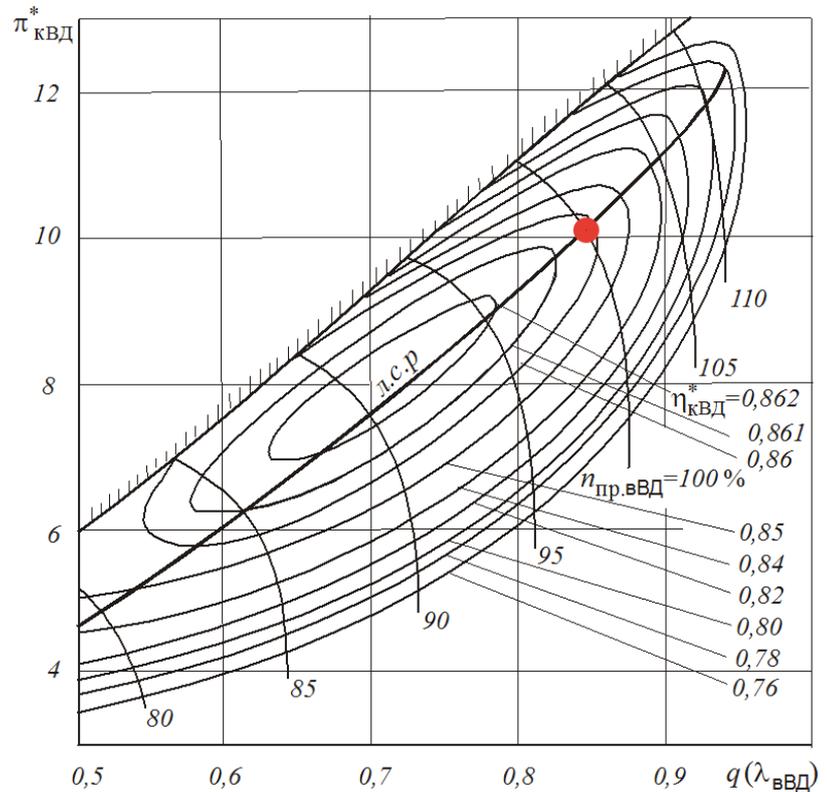
$n_{\text{вд.пр.ВВД}} = \text{const} ;$

$\left( T_{\Gamma}^* / T_{\text{ВВД}}^* \right) = \text{const} ;$

$\eta_{\text{квд}}^* = \text{const} ;$

$l_{\text{квд}} = \text{const} ;$

$\left( T_{\text{К}}^* / T_{\text{ВВД}}^* \right) = \text{const} .$



Аналогично:

$p_t$  на лср на хар . кнд = const ;

$\pi_{кнд}^* = \text{const} ;$

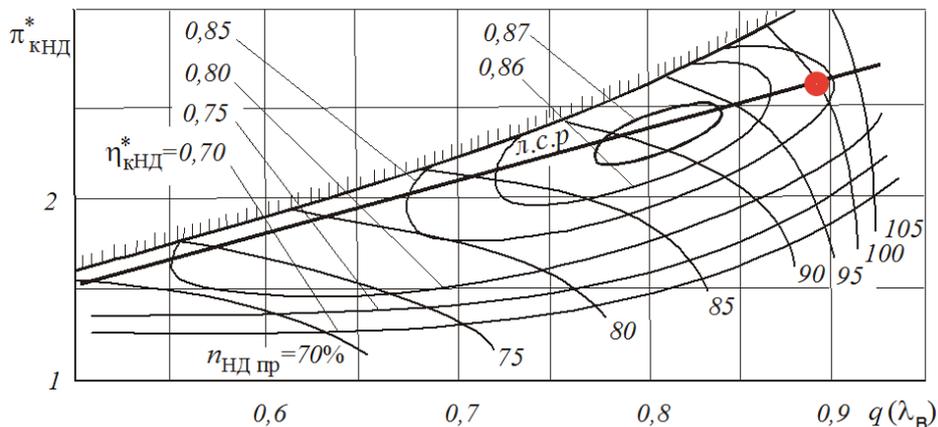
$q(\lambda_B) = \text{const} ;$

$n_{нд.пр} = \text{const} ;$

$\eta_{кнд}^* = \text{const} ;$

$l_{кнд} = \text{const} ;$

$\left( T_B^* / T_{ВВД}^* \right) = \text{const} .$



Остаются неизменными:

- степень двухконтурности и скольжение роторов

$$m = \text{const} , \left( n_{\text{ВД}} / n_{\text{НД}} \right) = \text{const} ;$$

- суммарная степень повышения давления в компрессоре

$$\pi_{\text{к}\Sigma}^* = \text{const} ;$$

- располагаемые степени понижения давления в соплах внутреннего и наружного контуров:

$$\pi_{\text{ср}} = \frac{\pi_V \cdot \sigma_{\text{ВХ}} \cdot \pi_{\text{КНД}}^* \cdot \pi_{\text{КВД}}^* \cdot \sigma_{\text{КС}}}{\pi_{\text{ТВД}}^* \cdot \pi_{\text{ТНД}}^*} = \text{const} ;$$

$$\pi_{\text{срII}} = \pi_V \cdot \sigma_{\text{ВХ}} \cdot \pi_{\text{кII}}^* \cdot \sigma_{\text{II}} = \text{const} ;$$

- отношения температур рабочего тела в любом сечении проточной части к  $T_H^*$

$$\left( T_i^* / T_H^* \right) = \text{const} .$$

- отношения давлений рабочего тела в любом сечении проточной части к  $p_H^*$

$$\left( p_i^* / p_H^* \right) = \text{const} .$$

Соответственно, сохраняются неизменными следующие размерные параметры:

- полные температуры в сечениях проточной части и, в том числе, перед турбиной :

$$T_i^* = \text{const} ; T_{\Gamma}^* = \text{const} .$$

- относительный расход топлива в камере сгорания:

$$q_m \sim (T_{\Gamma}^* - T_K^*) = \text{const} ;$$

- скорости истечения рабочего тела из сопел:

$$c_C = \varphi_c \sqrt{2000 \cdot c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^* \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{\pi_{ср} k_2}} \right)} = \text{const} ;$$

$$c_{\text{сII}} = \varphi_{\text{сII}} \sqrt{2000 \cdot c_{p6} \cdot T_{\text{II}}^* \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{k_6 - 1}{\pi_{срII} k_6}} \right)} = \text{const} .$$

- удельные тяги внутреннего, наружного контуров и двигателя в целом:

$$P_{Iуд} \approx (c_C - V_{п}) = \text{const} ;$$

$$P_{IIуд} \approx (c_{CII} - V_{п}) = \text{const} ;$$

$$P_{уд} = \frac{P_{Iуд} + P_{IIуд} \cdot m}{1 + m} = \text{const} ;$$

$$P_{удGI} = P_{Iуд} + P_{IIуд} \cdot m = \text{const} .$$

- удельный расход топлива:

$$C_{уд} = \frac{3600 \cdot q_m \cdot v_{KC}}{P_{удGI}} = \text{const} .$$

Пропорционально давлению атмосферного воздуха изменяются:

- полные давления в проточной части двигателя:

$$p_B^* \uparrow, p_{ВВД}^* \uparrow, p_K^* \uparrow, p_\Gamma^* \uparrow, p_{\GammaНД}^* \uparrow, p_T^* \uparrow, p_{II}^* \uparrow \sim p_H \uparrow;$$

- суммарный расход воздуха через двигатель, а также расходы воздуха через внутренний и наружный контуры:

$$G_{ВI} \uparrow, G_{ВII} \uparrow, G_B \uparrow \sim p_B^* \uparrow;$$

- расход топлива в камере сгорания:

$$G_m \uparrow \sim (q_m \cdot G_{ВI} \uparrow);$$

- тяга двигателя:

$$P \uparrow = P_{уд} \cdot G_B \uparrow.$$

**Графики ...**

**Выводы ...**

## Влияние $T_H$ .

Пусть температура атмосферного воздуха увеличивается  $T_H \uparrow$  при  $n_{\text{вд}} = \text{const}$ ,  $H_{\text{п}} = \text{const}$ ,  $p_H = \text{const}$ ,  $M_{\text{п}} = \text{const}$ .

Полная температура набегающего потока рабочего тела перед двигателем возрастает при неизменных полном давлении набегающего потока и степени повышения давления от скоростного напора набегающего потока:

$$T_H^* \uparrow \sim T_H \uparrow, p_H^* = \text{const}, \pi_V = \text{const}.$$

Приведенная частота вращения ротора ВД уменьшается:

$$n_{\text{ВД.пр}} \downarrow = n_{\text{ВД}} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\text{H}}^* \uparrow}}$$

Следовательно, рабочая точка на характеристике КВД смещается влево вниз.

рт  $\checkmark$  по лср на хар. квд ;

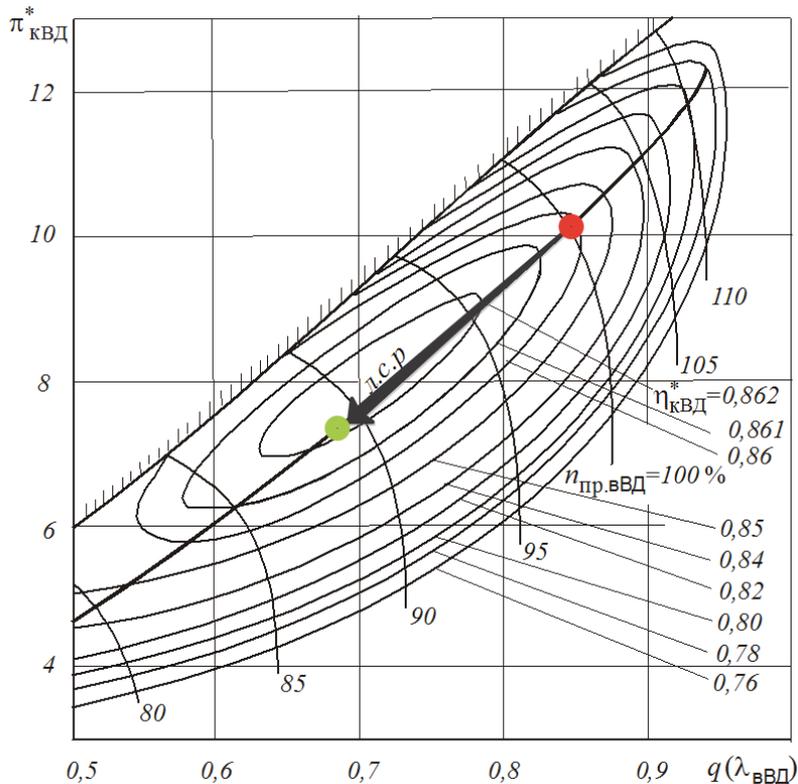
$$\pi_{\text{квд}}^* \downarrow ;$$

$$q(\lambda_{\text{ВВД}}) \downarrow ;$$

$$\left( T_{\Gamma}^* / T_{\text{ВВД}}^* \right) \downarrow ;$$

$$l_{\text{квд}} \downarrow ;$$

$$\left( T_{\text{К}}^* / T_{\text{ВВД}}^* \right) \downarrow .$$



Аналогично:

рт  $\searrow$  по лср на хар. кнд ;

$\pi_{\text{кнд}}^* \downarrow$  ;

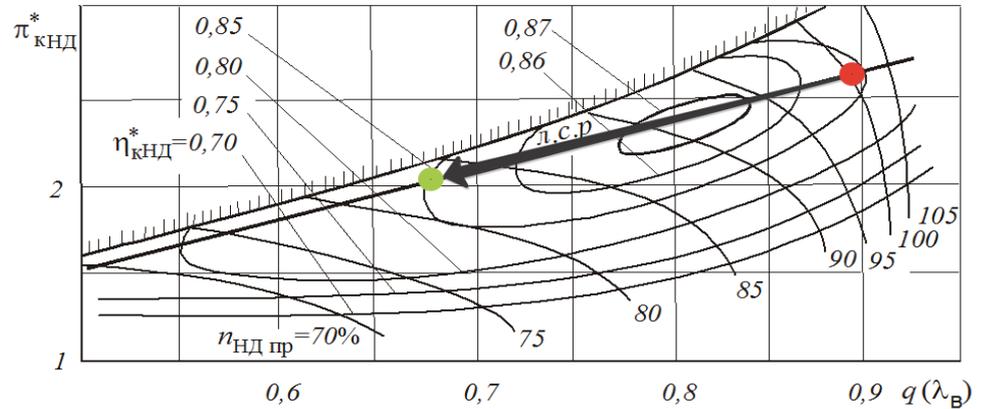
$q(\lambda_{\text{в}}) \downarrow$  ;

$n_{\text{нд.пр}} \downarrow$  ;

$\eta_{\text{кнд}}^* \downarrow$  ;

$l_{\text{кнд}} \downarrow$  ;

$(T_{\text{ввд}}^*/T_{\text{в}}^*) \downarrow$  .



Степень двухконтурности и скольжение роторов увеличиваются

$$m \uparrow, \left( n_{\text{ВД}} / n_{\text{НД}} \right) \uparrow.$$

В соответствии с уравнением баланса мощности компрессора и турбины ВД уменьшается отношение температур  $T_{\Gamma}^* / T_{\text{К}}^*$  :

$$\left( \frac{l_{\text{КВД}}}{1 + l_{\text{КВД}}} \right) \downarrow = \left( \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{К}}^*} \right) \downarrow \cdot l_{\text{ТВД}} \cdot B_{\text{ВД}}.$$

Уменьшаются отношения температур  $T_{\text{К}}^* / T_{\text{Н}}^*$  и  $T_{\Gamma}^* / T_{\text{Н}}^*$  :

$$\left( T_{\text{К}}^* / T_{\text{Н}}^* \right) \downarrow, \left( T_{\Gamma}^* / T_{\text{Н}}^* \right) \downarrow.$$

Известно, что при управлении турбореактивных двигателей по закону  $n_{ВД} = \text{const}$  при увеличении полной температуры воздуха на входе в двигатель  $T_H^* \uparrow$  в диапазоне дозвуковых скоростей полета и при  $\pi_{квд0}^* > 6$ , характерного для большинства современных двигателей, температура газа перед турбиной возрастает  $T_\Gamma^* \uparrow$ .

Вследствие уменьшения отношения температур  $(T_\Gamma^*/T_{ВД}^*) \downarrow$  и  $(T_\Gamma^*/T_K^*) \downarrow$  увеличиваются полные температуры в сечениях за компрессорами НД и ВД, а также в сечении на входе в сопло наружного контура:

$$T_{ВД}^* \uparrow = \frac{T_\Gamma^* \uparrow}{(T_\Gamma^*/T_{ВД}^*) \downarrow}, \quad T_K^* \uparrow = \frac{T_\Gamma^* \uparrow}{(T_\Gamma^*/T_K^*) \downarrow}, \quad T_\Pi^* \uparrow \sim T_{ВД}^* \uparrow.$$

Полные температуры в сечениях за турбинами ВД и НД увеличиваются пропорционально  $T_{\Gamma}^*$  :

$$T_{\Gamma}^* \uparrow \sim T_{\Gamma\text{НД}}^* \uparrow \sim T_{\Gamma}^* \uparrow .$$

На величину относительного расхода топлива в камере сгорания преобладающее влияние оказывает увеличение  $T_{\text{К}}^*$ , вследствие чего она уменьшается:

$$q_m \downarrow \sim (T_{\Gamma}^* \uparrow - T_{\text{К}}^* \uparrow \uparrow) .$$

Уменьшаются суммарная степень повышения давления в компрессоре и, соответственно, располагаемые степени понижения давления в соплах внутреннего и наружного контуров:

$$\pi_{k\Sigma}^* \downarrow ;$$

$$\pi_{ср} \downarrow = \frac{\pi_V \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кнд}^* \downarrow \cdot \pi_{квд}^* \downarrow \cdot \sigma_{кс}}{\pi_{твд}^* \cdot \pi_{тнд}^*} ;$$

$$\pi_{срII} \downarrow = \pi_V \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кII}^* \downarrow \cdot \sigma_{II} .$$

Скорости истечения рабочего тела из сопел уменьшаются вследствие преобладающего влияния уменьшения  $\pi_{ср}$  и  $\pi_{срII}$ :

$$c_C \downarrow = \varphi_C \sqrt{2000 \cdot c_{pз} \cdot T_T^* \uparrow \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{k_z - 1}{k_z} \pi_{ср} \downarrow \downarrow} \right)};$$

$$c_{сII} \downarrow = \varphi_{сII} \sqrt{2000 \cdot c_{pв} \cdot T_{II}^* \uparrow \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{k_в - 1}{k_в} \pi_{срII} \downarrow \downarrow} \right)}.$$

Уменьшаются удельные тяги внутреннего, наружного контуров и двигателя в целом:

$$P_{Iуд} \downarrow \approx (c_{сI} \downarrow - V_{п});$$

$$P_{IIуд} \downarrow \approx (c_{сII} \downarrow - V_{п});$$

$$P_{уд} \downarrow = \frac{P_{Iуд} \downarrow + P_{IIуд} \downarrow \cdot m}{1 + m}.$$

Уменьшаются полные давления в проточной части двигателя:

$$p_i^* \downarrow .$$

Уменьшаются суммарный расход воздуха через двигатель, а также расходы воздуха через внутренний и наружный контуры:

$$G_B \downarrow \sim \frac{q(\lambda_B) \downarrow}{\sqrt{T_B^* \uparrow}} ;$$

$$G_{BI} \downarrow \sim \frac{p_{\Gamma}^* \downarrow}{\sqrt{T_{\Gamma}^* \uparrow}} ;$$

$$G_{BII} \downarrow \sim \frac{p_{II}^* \downarrow}{\sqrt{T_{II}^* \uparrow}} .$$

Уменьшается расход топлива в камере сгорания:

$$G_m \downarrow \sim (q_m \downarrow \cdot G_{BI} \downarrow) .$$

Уменьшается тяга двигателя:

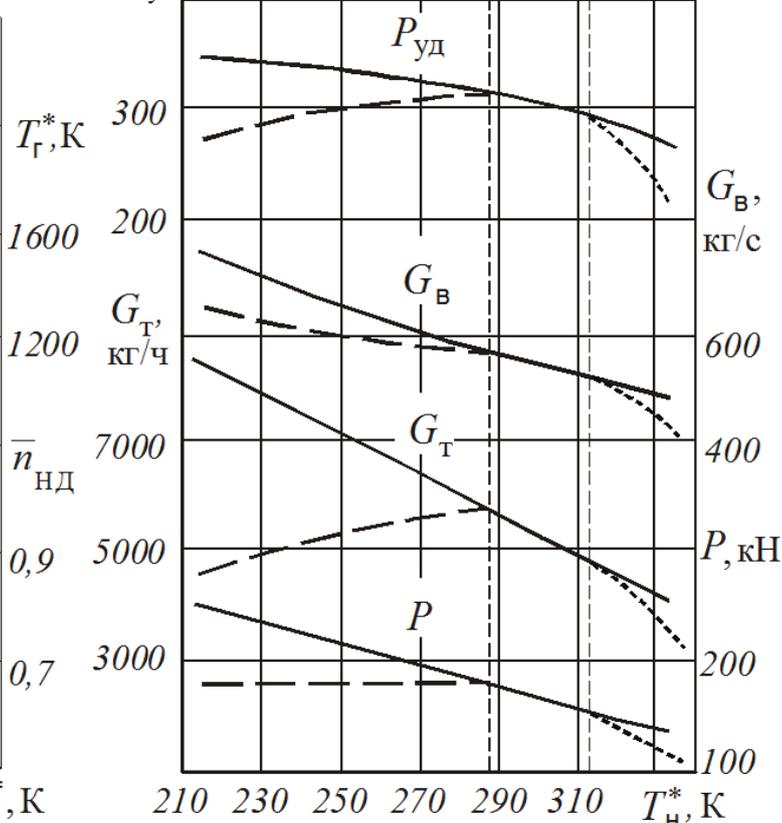
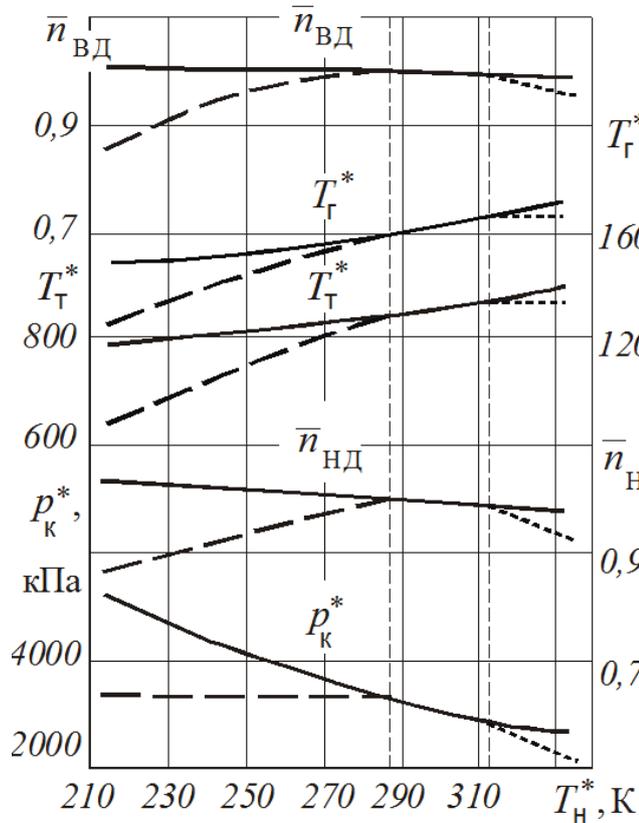
$$P \downarrow = P_{\text{уд}} \downarrow \cdot G_{\text{В}} \downarrow .$$

На изменение удельного расхода топлива  $C_{\text{уд}}$  преимущественное влияние оказывает снижение эффективного КПД  $\eta_e^* \downarrow$  из-за уменьшения  $\pi_{\text{к}\Sigma}^* \downarrow$ . Вследствие этого удельный расход топлива возрастает:

$$C_{\text{уд}} \uparrow .$$

# Графики климатических характеристик ТРДД при $T_H = \text{var}$

$P_{уд}, \text{Н}\cdot\text{с}/\text{кг}$



## Выводы

Тяга двигателя  $P$  с увеличением  $T_H$  значительно уменьшается, так как снижаются и удельная тяга  $P_{уд}$ , и расход воздуха  $G_B$ . Например, в диапазоне температур от 233 до 313 К тяга может уменьшиться более чем на 30 %. Такое снижение тяги недопустимо, так как оно приводит к снижению тяговооруженности самолета в летних условиях и ухудшает его взлетные качества. Поэтому обычно перед разработчиками двигателя ставится задача обеспечения заданной максимальной тяги не в стандартных, а в более тяжелых для взлета условиях при  $T_H=303$  К и  $p_H=97,3$  кПа .

## Ограничения

Применение закона управления  $n_{\text{вд}} = \text{const}$  на двигателе, спроектированном из условия обеспечения данного требования, будет приводить к превышению в зимних условиях максимальной заданной тяги. Увеличатся также давление рабочего тела в проточной части, расход воздуха, топлива и другие параметры. Соответственно повысятся нагрузки на узлы и элементы конструкции: увеличатся растягивающие усилия на оболочках, изгибные напряжения в лопатках компрессора и турбины, осевые усилия на подшипниках и крутящие моменты на валах.

Двигатель в зимних условиях будет перегруженным, а следовательно и перетяжеленным. Поэтому рассматриваемый закон управления применять на максимальном режиме в широком диапазоне температур  $T_{\text{Н}}$  нецелесообразно.

Чтобы не перегружать двигатель в зимних условиях и уменьшить его массу, максимальную тягу ограничивают, например, путем ограничения максимального давления за компрессором из условия  $p_k^* \leq p_{kmax}^*$ . Если давление за компрессором в данных условиях работы больше  $p_{kmax}^*$ , то ограничитель давления подает сигнал на уменьшение расхода топлива, обеспечивая таким образом  $p_k^* = p_{kmax}^*$ .

При  $p_H = \text{const}$ , равенство  $p_k^* = p_{kmax}^*$  эквивалентно условию  $\pi_{k\Sigma max}^* = \text{const}$ , то есть положение рабочей точки на характеристике компрессора не изменяется в зоне ограничения тяги, режимы работы двигателя подобны, а изменение параметров можно определить с помощью формул приведения (штриховые линии на климатических характеристиках при  $T_H < 288 \text{ K}$ ).

В систему управления современных двигателей вводится, как правило, еще и ограничение максимальной температуры перед турбиной. Такое ограничение необходимо, поскольку при постоянной частоте вращения ротора  $n_{вд} = \text{const}$  температура  $T_{Г}^*$  в большинстве случаев возрастает. Ограничение может производиться по температуре газа за турбиной  $T_{Т}^*$ , так как она изменяется пропорционально  $T_{Г}^*$ . При работе двигателя в зоне ограничения температуры  $T_{Г}^*$  увеличение  $T_{Н}$  приводит к еще большему снижению тяги двигателя.

В итоге, максимальный режим работы двигателя задается тремя параметрами: частотой вращения  $n_{вд}$ , максимальным давлением  $p_{кmax}^*$  и температурой газа за турбиной  $T_{Тmax}^*$ . Такое же изменение всех параметров и тяги в зависимости от температуры наружного воздуха можно обеспечить, выбрав закон управления  $n_{вд} = f(T_{Н})$ .