



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 аппа

Глава 8. Анализ основных характеристик ТРДД

§ 8.4. Анализ высотных характеристик

Задание

Проанализируйте высотные характеристики двухвального ТРДД при $n_{ВД} = \text{const}$.

Определение

Высотными характеристиками ТРДД называют зависимости тяги, удельного расхода топлива, расхода воздуха, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях и других параметров двигателя от высоты полета H_{Π} на постоянном режиме работы двигателя и при неизменной скорости полета $M_{\Pi} = \text{const}$.

Схема двигателя (см. § 8.2.)

Допущения (см. § 8.2.)

Анализ

Пусть высота полета увеличивается $H_{\Pi} \uparrow$ при $n_{\text{ВД}} = \text{const}$, $M_{\Pi} = \text{const}$.

При изменении высоты изменяются давление p_{H} и температура T_{H} атмосферного воздуха. Поэтому влияние высоты на параметры двигателя сводится к совместному влиянию изменения давления и температуры наружного воздуха.

В стандартных условиях при увеличении высоты от 0 до 11 км температура и давление атмосферного воздуха снижаются:

$$T_{\text{H}} \downarrow, p_{\text{H}} \downarrow.$$

Снижаются полная температура и давление набегающего потока рабочего тела перед двигателем при неизменной степени повышения давления от скоростного напора набегающего потока:

$$p_{\text{H}}^* \downarrow \sim p_{\text{H}} \downarrow, T_{\text{H}}^* \downarrow \sim T_{\text{H}} \downarrow, \pi_{\text{V}} = \text{const}.$$

Аналогично:

рт ↗ по лср на хар. кнд ;

$\pi_{\text{кнд}}^* \uparrow$;

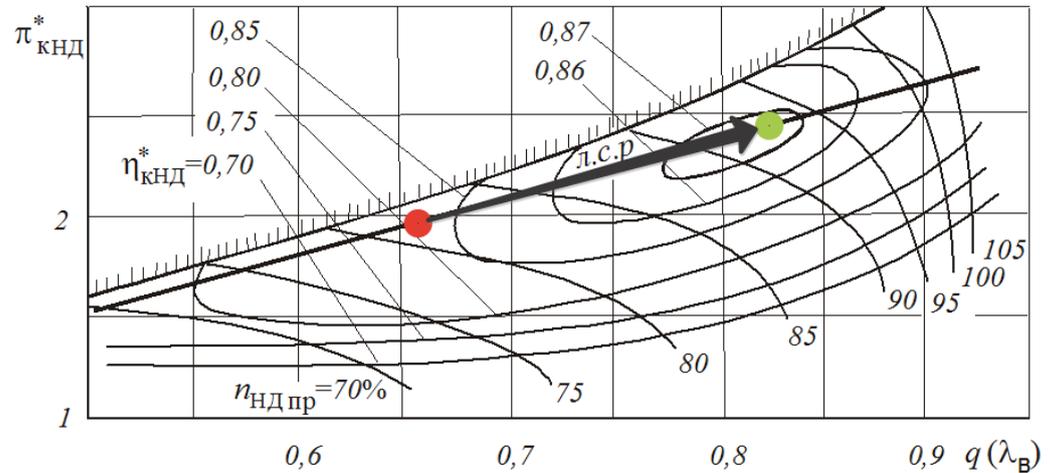
$q(\lambda_{\text{в}}) \uparrow$;

$n_{\text{нд.пр}} \uparrow$;

$\eta_{\text{кнд}}^* \uparrow$;

$l_{\text{кнд}} \uparrow$;

$\left(T_{\text{ввд}}^*/T_{\text{в}}^*\right) \uparrow$.



Уменьшаются степень двухконтурности и скольжение роторов:

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

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

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

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

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

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

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

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

Полные температуры в сечениях за турбинами ВД и НД уменьшаются пропорционально T_{Γ}^* :

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

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

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

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

$$\pi_{\kappa\Sigma}^* \uparrow ;$$

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

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

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

$$c_C \uparrow = \varphi_C \sqrt{2000 \cdot c_{pз} \cdot T_T^* \downarrow \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{k_2} \pi_{ср} \uparrow \uparrow} \right)};$$

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

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

$$P_{Iуд} \uparrow \approx (c_C \uparrow - V_{п});$$

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

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

В стандартных условиях при увеличении высоты от 0 до 11 км температура T_H снижается от 288 до 216,5 К, то есть примерно на 25 %. При этом давление снижается от 101,3 до 22,7 кПа, то есть в 4,5 раза.

Снижение давления атмосферного воздуха оказывает решающее влияние на значения полного давления рабочего тела в проточной части двигателя:

$$p_i^* \downarrow .$$

Например, не смотря на увеличении степени повышения давления, полное давление воздуха за компрессором снижается:

$$p_K^* \downarrow = p_H \downarrow \downarrow \cdot \pi_V \cdot \sigma_{ВХ} \cdot \pi_{кнд}^* \uparrow \cdot \pi_{квд}^* \uparrow .$$

Снижение давления так же оказывает решающее влияние на расход воздуха:

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

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

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

В свою очередь, изменение расхода воздуха оказывает преобладающее влияние на расход топлива и тягу:

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

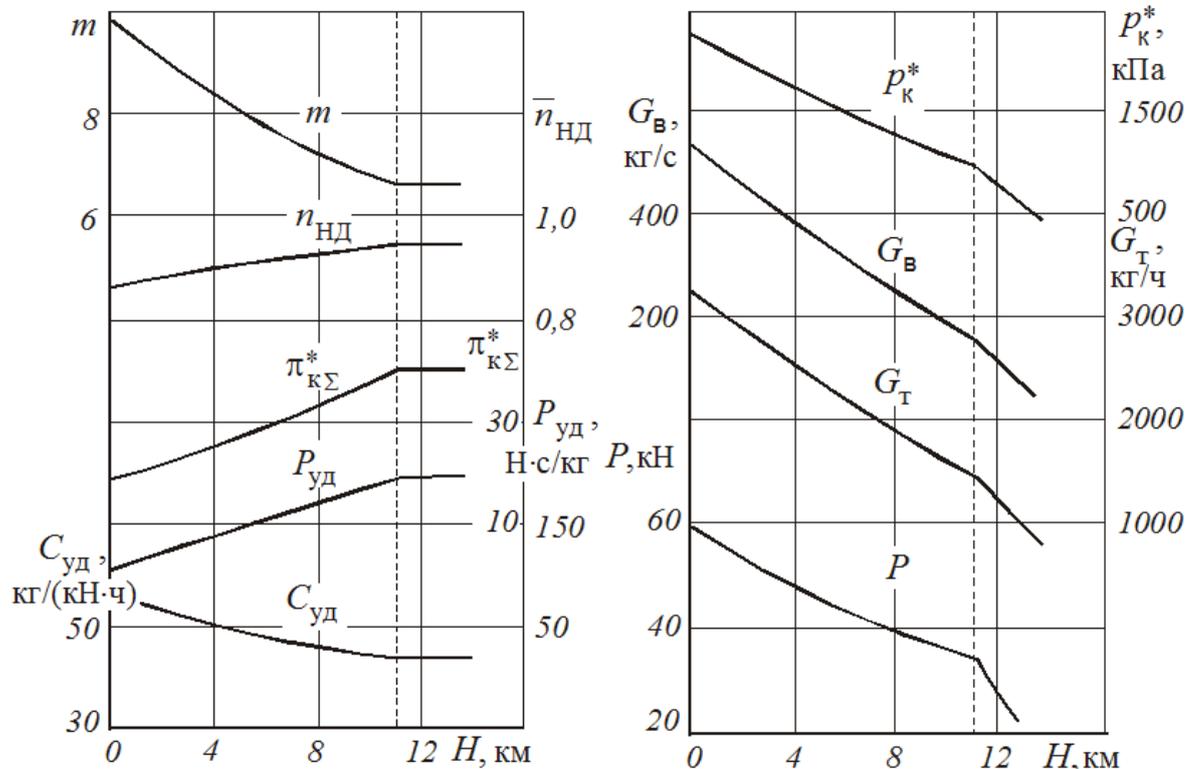
$$P \downarrow = P_{уд} \uparrow \cdot G_B \downarrow \downarrow .$$

Уменьшение $T_{\Gamma}^* \downarrow$ и увеличение $\pi_{\kappa\Sigma}^* \uparrow$ ведет к повышению как эффективного КПД $\eta_e^* \uparrow$, вследствие чего удельный расхода топлива снижается (это аналогично результату анализа уменьшения полной температуры на входе в двигатель $T_H^* \downarrow$):

$$C_{\text{уд}} \downarrow.$$

На высотах от 11 до 20 км температура наружного воздуха сохраняется неизменной $T_H = \text{const}$. На этих высотах удельные параметры двигателя остаются постоянными, а расход воздуха через двигатель, тяга и расход топлива изменяются пропорционально давлению наружного воздуха.

Графики высотных характеристик ТРДД



Выводы ...