



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 5. Анализ уравнений совместной работы узлов выполненного ТРДД

§ 5.2. Совместная работа турбины НД и сопла

Для выявления основных закономерностей совместной работы турбины и сопла необходимо уравнение баланса расходов, решить с учетом характеристик этих узлов.

Запишем уравнение баланса расходов для минимальных (критических) сечений на выходе из первого соплового аппарата СА.НД и сопла С.КР:

$$G_{\text{СА.НД}} \cdot v_{(\text{СА.НД}-\text{С.КР})} = G_{\text{С.КР}} \cdot$$

Выразим расходы $G_{\text{СА.НД}}$ и $G_{\text{С.КР}}$ через относительные пропускные способности турбины и сопла

$$\frac{m_2 \cdot p_{\text{ГНД}}^* \cdot \mu_{\text{са.нд}} q(\lambda_{\text{СА.НД}}) \cdot F_{\text{СА.НД}}}{\sqrt{T_{\text{ГНД}}^*}} \cdot v_{(\text{СА.НД}-\text{С.КР})} = \frac{m_2 \cdot p_{\text{Т}}^* \cdot \mu_{\text{с}} q(\lambda_{\text{С.КР}}) \cdot F_{\text{С.КР}}}{\sqrt{T_{\text{Т}}^*}} \cdot$$

$$\pi_{\text{ТНД}}^* \cdot \sqrt{T_{\text{Т}}^* / T_{\text{ГНД}}^*} \cdot v_{(\text{СА.НД}-\text{С.КР})} = \frac{\mu_{\text{с}} q(\lambda_{\text{С.КР}}) \cdot F_{\text{С.КР}}}{\mu_{\text{са.нд}} q(\lambda_{\text{СА.НД}}) \cdot F_{\text{СА.НД}}} \cdot$$

Введем понятие: l_T - относительная работа турбины, равная отношению удельной работы турбины к полной энтальпии рабочего тела на входе:

$$l_T = \frac{L_T}{c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^*} = \left(1 - \frac{1}{\frac{\pi_T^*}{k_2}} \right) \cdot \eta_T^* = 1 - \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\Gamma}^*}.$$

Тогда, для турбины НД

$$T_{\Gamma}^*/T_{\Gamma\text{НД}}^* = 1 - l_{\text{ТНД}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{\frac{\pi_{\text{ТНД}}^*}{k_2}} \right) \cdot \eta_{\text{ТНД}}^*.$$

С учетом данного равенства запишем искомое уравнение в окончательной форме.

Уравнение совместной работы турбины НД и сопла внутреннего контура:

$$\pi_{\text{ТНД}}^* \cdot \sqrt{1 - l_{\text{ТНД}}} \cdot v_{(\text{СА. НД} - \text{С. КР})} = \frac{\mu_{\text{С}} q(\lambda_{\text{С. КР}}) \cdot F_{\text{С. КР}}}{\mu_{\text{СА. НД}} q(\lambda_{\text{СА. НД}}) \cdot F_{\text{СА. НД}}}. \quad [2]$$

На выполненном двигателе степень понижения давления $\pi_{\text{ТНД}}^*$ определяется из условия совместной работы турбины и сопла, в отличие от проектируемого ТРДД, на котором $\pi_{\text{ТНД}}^*$ определяется из условия баланса мощности турбины и компрессора.

Уравнение [2] можно упростить, поскольку для основных рабочих режимов допустимо принять:

$$\frac{\mu_c}{\mu_{\text{са.нд}}} = 1;$$

$$v_{(\text{са.нд}-\text{с.кр})} = 1;$$

$$q(\lambda_{\text{са.нд}}) = 1.$$

Тогда

$$\pi_{\text{ТНД}}^* \cdot \sqrt{1 - l_{\text{ТНД}}} = q(\lambda_{\text{с.кр}}) \frac{F_{\text{с.кр}}}{F_{\text{са.нд}}}. \quad [2a]$$

Выводы по уравнению [2]:

1. Из [2а] следует, что **на режимах сверхкритического истечения газа из сопла**, т.е. при $q(\lambda_{C.KP})=1$, степень понижения давления газа в турбине НД практически однозначно определяется отношением площадей $F_{C.KP}/F_{CA.НД}$, а следовательно **при нерегулируемых площадях величина степени понижения давления в турбине НД постоянна** $\pi_{ТНД}^* \approx \text{const}$.

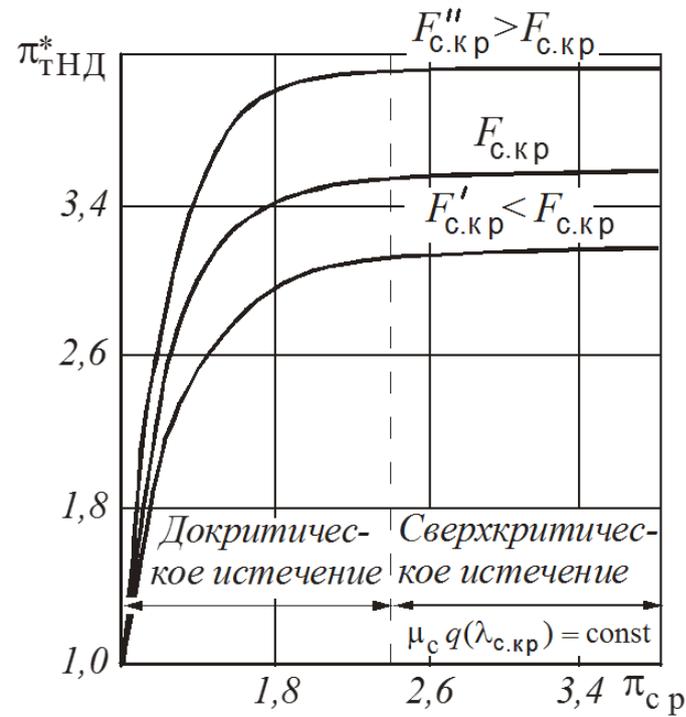
В этом случае изменяющиеся внешние условия не влияют на пропускную способность сопла и работу турбины, так как малые возмущения не распространяются против течения сверхзвукового потока. Турбина газодинамически «заперта» звуковым потоком.

2. На режимах докритического истечения газа из сопла при нерегулируемых площадях $F_{C.KP}/F_{CA.HД} = \text{const}$ величина $\pi_{ТНД}^*$ определяется только относительной плотностью тока $q(\lambda_{C.KP})$, а поскольку относительная плотность тока зависит от степени понижения давления $\pi_{ср}$, то, следовательно, **из условия совместной работы турбины и сопла однозначно определяется зависимость $\pi_{ТНД}^* = f(\pi_{ср})$.**

Эта зависимость может быть рассчитана в такой последовательности:

- задаемся различными значениями степени понижения давления в турбине $\pi_{ТНД}^*$;
- по характеристике турбины находим $\mu_{ca.нд} q(\lambda_{CA.HД})$ и $\eta_{ТНД}^*$;
- далее по уравнению [2] определяем $\mu_c q(\lambda_{C.KP})$;
- по характеристике сопла определяем $\pi_{ср}$.

Турбина и сопло имеют две характерные зоны работы: докритического и сверхкритического истечения газа из сопла. Величина $\pi_{\text{ТНД}}^*$ изменяется только при докритическом истечении газа вследствие изменения пропускной способности $\mu_c q(\lambda_{\text{с.кр}})$.



На основных режимах работы ТРД при различных внешних условиях степень расширения газа в канале сопла, хотя и изменяется в широких пределах, обычно бывает сверхкритической, поэтому при анализе совместной работы узлов этого двигателя **можно** принять $\pi_{T(нд)}^* \approx \text{const}$.

Для турбовинтового двигателя область основных рабочих режимов лежит в зоне докритического истечения газа из сопла. Поэтому **изменение внешних условий или режима работы приводит к изменению $\pi_{ср} \neq \text{const}$ и, соответственно, к существенному изменению степени понижения давления в турбине $\pi_{T(нд)}^* \neq \text{const}$.**

Область рабочих режимов для ТРДД лежит между зонами режимов для ТРД и ТВД, причем с увеличением степени двухконтурности она сдвигается в сторону меньших значений $\pi_{ср}$, что оказывает существенное влияние на особенности изменения $\pi_{тнд}^*$.

3. Величину $\pi_{\text{ТНД}}^*$ можно изменять путем регулирования площадей $F_{\text{С.КР}}$ и $F_{\text{СА.НД}}$.

Уменьшение площади выходного сечения $F_{\text{С.КР}} \downarrow$ приводит к снижению $\pi_{\text{ТНД}}^* \downarrow$. Это объясняется уменьшением пропускной способности сопла: через уменьшенную площадь сечения газ может пройти, только при увеличенном давлении $p_{\text{Т}}^* \uparrow$, что приводит к снижению $\pi_{\text{ТНД}}^* \downarrow$.

При уменьшении площади $F_{\text{СА.НД}} \downarrow$ значение $\pi_{\text{ТНД}}^* \uparrow$ возрастает, так как давление растет перед турбиной $p_{\text{ГНД}}^* \uparrow$.