



**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

### § 8.1. Обобщенные характеристики двигателя

**Характеристики двигателя** – это зависимости основных данных, удельных параметров, температуры и давления газа в различных сечениях проточной части и других параметров двигателя от режима его работы или от внешних – атмосферных ( $p_H, T_H$ ) и полетных ( $H_{\Pi}, M_{\Pi}$ ) – условий.

**Характеристики двигателя** разделяются соответственно на **дроссельные** и внешние.

Внешние характеристики подразделяются на **климатические, высотные и скоростные** – это зависимости перечисленных параметров соответственно от давления  $p_H$  и температуры  $T_H$  наружного воздуха, от высоты  $H_{\Pi}$  и скорости полета  $M_{\Pi}$  при работе двигателя на постоянном режиме.

В соответствии с § 7.5 изменение критериев подобия (числа  $M_{\Pi}$  и, например,  $T_{\Gamma.пр}^*$  или  $n_{вд.пр}$ ) означает переход с одного множества подобных режимов на множество других подобных режимов, который сопровождается изменением положения рабочих точек на характеристиках узлов, а также приведенных параметров.

**Обобщенные характеристики** двигателя - зависимости приведенных параметров, а также параметров, характеризующих положение рабочих точек на характеристиках узлов, от критериев подобия.

Эти зависимости справедливы для любых атмосферных и полетных условий и в этом смысле являются универсальными (обобщенными).

### 8.1.1. Основные закономерности изменения параметров турбокомпрессора

**Положение рабочей точки** определяется отношением температур  $T_{\Gamma}^*/T_{\text{Н}}^*$  и, следовательно, **изменяется**,

- во-первых, **из-за изменения** температуры газа перед турбиной  $T_{\Gamma}^*$ , то есть **режима работы двигателя**;
- во-вторых, **вследствие изменения** полной температуры воздушного потока на входе в двигатель  $T_{\text{Н}}^*$ , то есть под воздействием **внешних условий**.

Например, смещение рабочей точки на линии совместной работы влево вниз  $pt \searrow$ , соответствующее уменьшение  $\pi_{\text{к}}^* \downarrow$  и приведенного расхода воздуха через двигатель  $G_{\text{в.пр}} \downarrow$ , может быть вызвано либо снижением  $T_{\Gamma}^* \downarrow$ , либо увеличением  $T_{\text{Н}}^* \uparrow$ .

## Важные следствия:

- Поэтому на постоянном режиме работы двигателя (при  $T_{\Gamma}^* = \text{const}$ ) все приведенные параметры турбокомпрессора зависят только от температуры  $T_{\text{H}}^*$ .
- Физические значения параметров, в формулу приведения которых не входит давление  $p_{\text{H}}^*$  (например, частота вращения ротора  $n$  или температура газа  $T_i^*$ ), однозначно определяются температурой  $T_{\text{H}}^*$ :

$$n = n_{\text{пр}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{H}}^*}{288}} \Rightarrow n = f(T_{\text{H}}^*) \text{ при } T_{\Gamma}^* = \text{const}.$$

- Физические значения давления рабочего тела  $p_i^*$ , расхода воздуха через двигатель  $G_{\text{В}}$ , расхода топлива через камеру сгорания  $G_{\text{м}}$  и тяги двигателя  $P$ , в формулы приведения которых входит  $p_{\text{H}}^*$ , на подобных режимах изменяются пропорционально  $p_{\text{H}}^*$ .

### 8.1.2. Анализ зависимости приведенных и относительных параметров двигателя от критериев подобия

Влияние  $n_{\text{вд.пр}}$  при  $M_{\text{п}} = \text{const}$ .

Увеличение приведенной частоты вращения ротора ВД  $n_{\text{вд.пр}} \uparrow$  сопровождается смещением рабочей точки на характеристиках компрессоров ВД и НД вправо вверх  $p_T \nearrow$  по линиям совместной работы.

Степень повышения давления компрессора  $\pi_{\text{к}\Sigma}^* \uparrow$  и приведенный расход воздуха через двигатель  $G_{\text{в.пр}} \uparrow$  возрастают благодаря увеличению степени подогрева газа в камере сгорания  $(T_{\text{Г}}^*/T_{\text{Н}}^*) \uparrow$ .

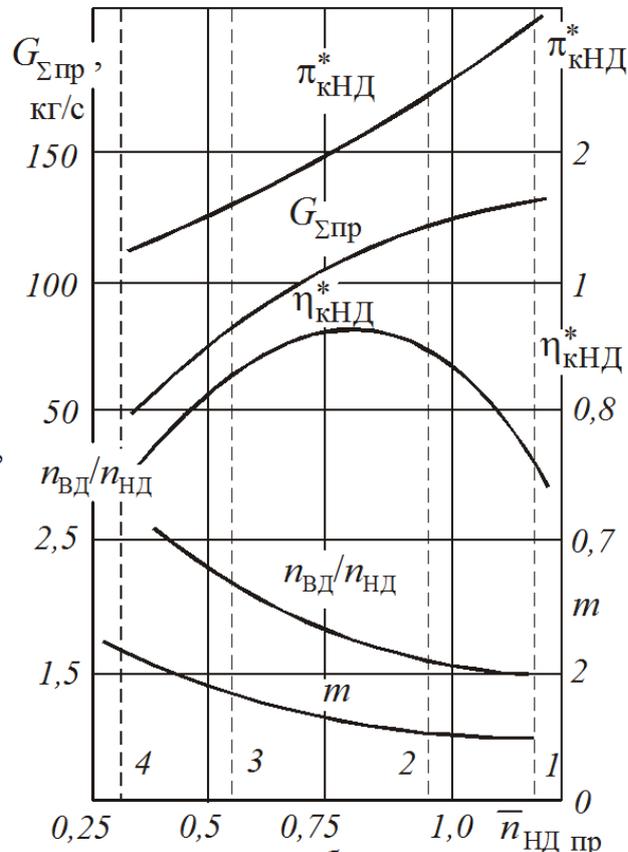
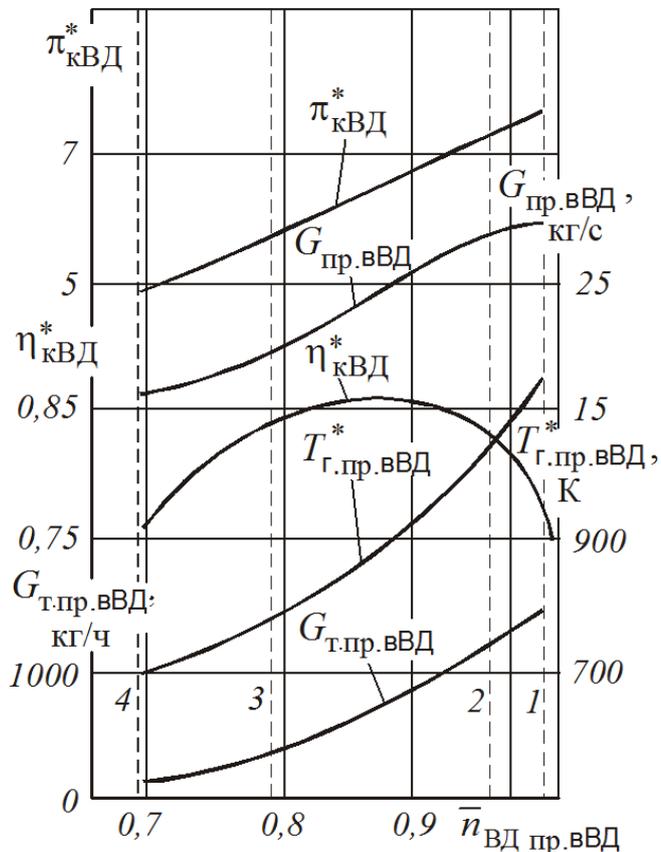
Это приводит к увеличению степени повышения давления  $\pi_{\text{тк}}^* \uparrow = (p_{\text{Т}}^*/p_{\text{В}}^*) \uparrow$  и температуры  $(T_{\text{Т}}^*/T_{\text{Н}}^*) \uparrow$  в турбокомпрессоре, а следовательно, к росту скорости истечения газа из сопла внутреннего контура  $c_{\text{с.пр}} \uparrow$  и удельной тяги  $P_{\text{уд.л.пр}} \uparrow$ .

Аналогично изменяются параметры наружного контура.

В результате полная тяга  $P_{\text{пр}} \uparrow$  значительно возрастает (на 3...4 % при увеличении частоты  $n_{\text{вд.пр}} \uparrow$  на 1 %) вследствие увеличения удельной тяги и расхода воздуха.

Удельный расход топлива  $C_{\text{уд.пр}}$  с увеличением частоты вращения ротора  $n_{\text{вд.пр}} \uparrow$  изменяется аналогично его изменению по температуре газа перед турбиной:

- на низких и средних режимах он снижается  $C_{\text{уд.пр}} \downarrow$ , что объясняется в основном ростом  $\pi_{\text{к}\Sigma}^* \uparrow$  и, соответственно, увеличением эффективного КПД двигателя  $\eta_e \uparrow$ ;
- на высоких режимах удельный расход топлива растет  $C_{\text{уд.пр}} \uparrow$ , что объясняется преобладающим влиянием роста  $T_{\text{Г.пр}}^*$  и, соответственно, снижением полетного КПД  $\eta_{\text{п}} \downarrow$  (при  $V_{\text{п}} > 0$ ).



Обобщенные характеристики турбокомпрессора двухвального ТРДД

На обобщенных характеристиках прослеживаются три зоны:

- 1–2 – высоких режимов;
- 2–3 – средних режимов;
- 3–4 – низких режимов.

Зона высоких режимов (1 – 2) характеризуется резким снижением КПД компрессора с увеличением приведенной частоты вращения ротора и незначительным приростом приведенного расхода воздуха. Объясняется это тем, что скорость потока на входе в компрессор, увеличиваясь, достигает критического значения. Появляются волновые потери. При дальнейшем увеличении частоты вращения расход воздуха не увеличивается, происходит «запирание» на входе в компрессор.

Средняя зона (2–3) характеризуется незначительным изменением КПД компрессора, КПД других узлов сохраняются в этой зоне примерно постоянными.

В зоне низких режимов (3–4) при уменьшении  $n_{\text{вд.пр}}$  наблюдается снижение КПД компрессора и турбины, что объясняется отклонением углов атаки при обтекании лопаточных венцов от их оптимальных величин.

Таким образом, при отклонении и вправо, и влево от средней зоны снижается эффективность работы компрессора, а при малой приведенной частоте вращения ротора – также эффективность работы других узлов, что приводит к еще большему повышению удельного расхода топлива на низких и высоких режимах.

## Влияние $M_{\Pi}$ при $n_{\text{вд.пр}} = \text{const}$ .

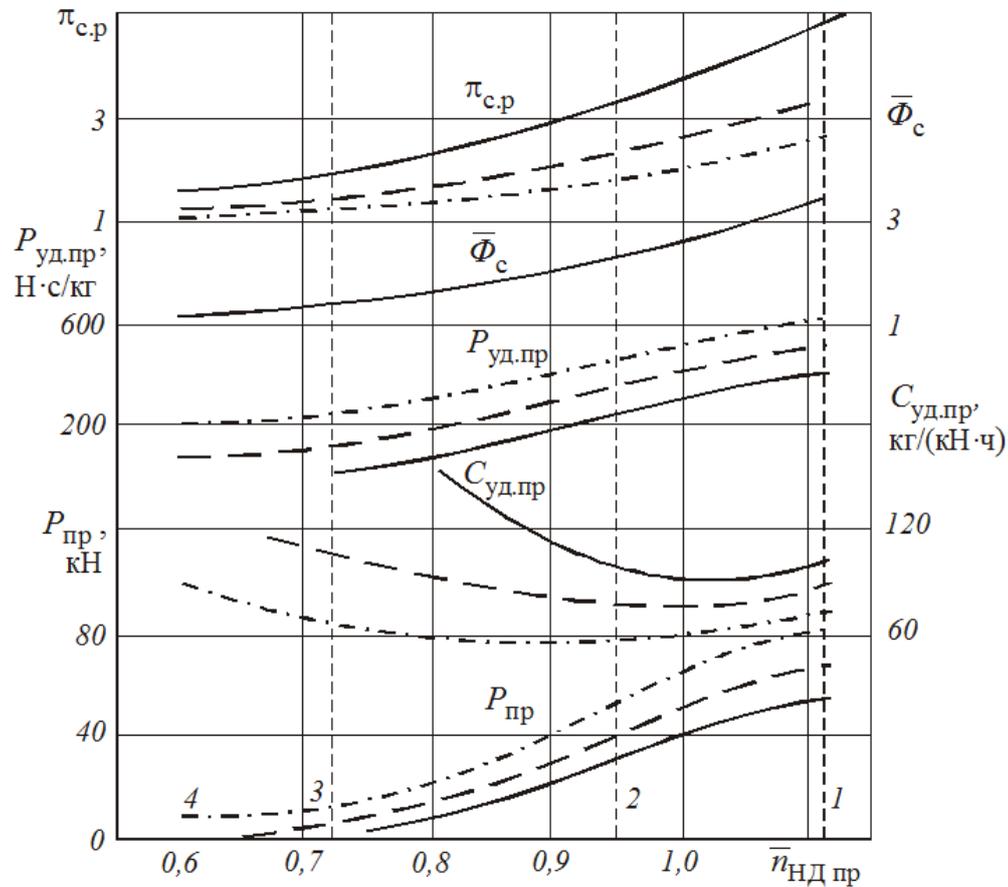
С повышением числа  $M_{\Pi} \uparrow$  увеличивается степень повышения давления в воздухозаборнике  $(\pi_V \uparrow \cdot \sigma_{\text{ВХ}}) \uparrow$ , пропорционально растет степень понижения давления в канале сопла (например, для внутреннего контура  $\pi_{\text{ср}} \uparrow = \pi_V \uparrow \cdot \sigma_{\text{ВХ}} \cdot \pi_{\text{ТК}}^*$ , соответственно увеличивается скорость истечения  $c_{\text{С.пр}} \uparrow$ .

Однако скорость истечения увеличивается меньше, чем скорость полета  $V_{\Pi.\text{пр}} \uparrow \uparrow$ .

В результате удельная тяга  $P_{\text{уд.пр}} \downarrow \sim (c_{\text{С.пр}} \uparrow - V_{\Pi.\text{пр}} \uparrow \uparrow)$  снижается, что приводит к пропорциональному снижению полной тяги  $P_{\text{пр}} \downarrow$  (так как приведенный расход воздуха сохраняется постоянным  $G_{\text{В.пр}} \sim q(\lambda_{\text{В}}) = \text{const}$ ) и обратно пропорциональному увеличению удельного расхода топлива  $C_{\text{уд.пр}} \uparrow$  (так как относительный расход топлива  $q_{\text{м.пр}} = \text{const}$  сохраняется постоянным).

Обобщенные  
характеристики ТРДД

- —  $M_{\pi}=1$  ;
- - - -  $M_{\pi}=0,5$  ;
- · - · - ·  $M_{\pi}=0$



При  $n_{\text{вд.пр}} = \text{const}$  изменение числа  $M_{\Pi}$  не нарушает подобия режимов работы турбокомпрессора, но приводит к изменению  $\pi_V$ ,  $\pi_{\text{ср}}$  и  $\pi_{\text{срII}}$ , характеризующих режим работы воздухозаборника, сопла, а следовательно, двигателя в целом.

**Режимы частичного подобия** — режимы работы двигателя, на которых при  $M_{\Pi} = \text{var}$  положение рабочих точек на характеристиках узлов турбокомпрессора одинаково и отличаются только положение рабочих точек на характеристиках входного устройства и сопла (сопел).

На режимах частичного подобия для приведения параметров турбокомпрессора к САУ можно применять формулы приведения. Однако они неприемлемы для приведения параметров воздухозаборника и сопла, а также тяги и удельного расхода топлива.

По обобщенным характеристикам легко определить тягу, удельный расход топлива, давление, температуру рабочего тела в характерных сечениях и другие параметры двигателя в различных условиях эксплуатации.

Для этого необходимо:

- найти положение рабочей точки на характеристике компрессора, соответствующее заданному режиму работы и заданным внешним условиям;
- определить значения относительных и приведенных параметров;
- по формулам приведения перейти к физическим параметрам.

Обобщенные характеристики содержат большой объем информации, представленный компактно. В этом их преимущество.

Однако основные данные и другие параметры двигателя рассчитываются по обобщенным характеристикам с определенной погрешностью, обусловленной принятыми допущениями при выводе формул приведения, что является основным недостатком рассматриваемых характеристик.