



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

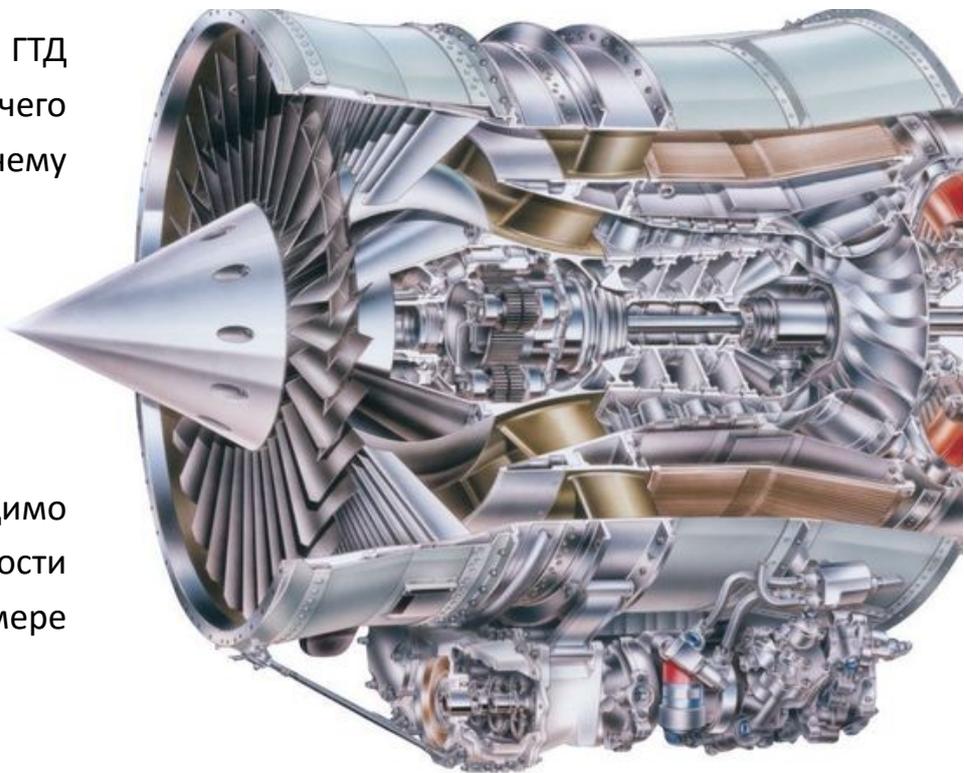
Глава 2. Термогазодинамический расчет рабочего процесса ГТД

§ 2.3. Воздушные компрессоры

2.3.1. Назначение

Воздушные компрессоры ГТД предназначены для сжатия рабочего тела (воздуха) за счет подвода к нему энергии в форме работы.

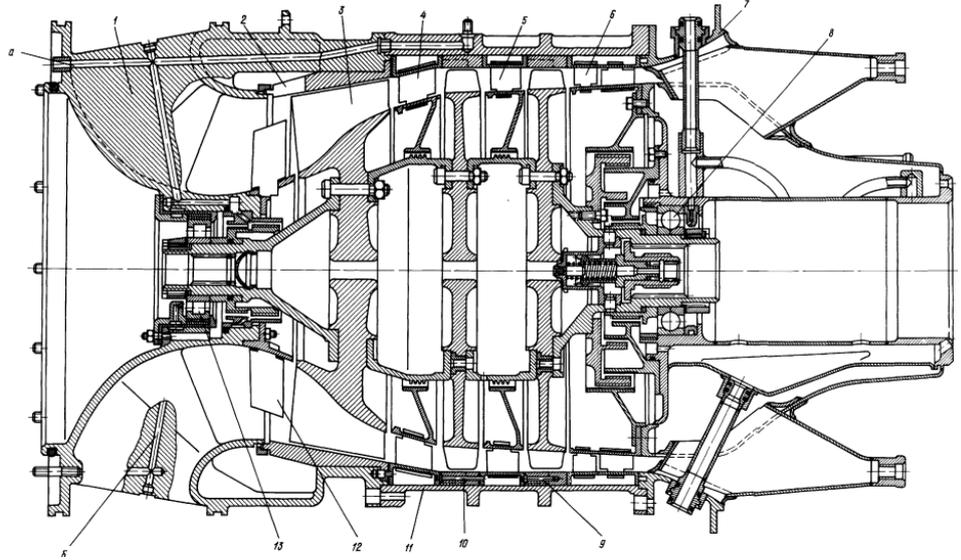
Сжатие рабочего тела необходимо для обеспечения возможности преобразования подводимого в камере сгорания тепла в полезную работу.



2.3.2. Классификация

Компрессоры классифицируются:

- по количеству каскадов - на однокаскадные и многокаскадные;
- по количеству ступеней - на одноступенчатые и многоступенчатые;
- по типу ступени - на осевые, центробежные, диагональные и комбинированные (осецентробежные, диагонально-осевые);
- и др.



2.3.3. Параметры режима работы

$q(\lambda_B)$ - относительная плотность тока в сечении на входе в компрессор.

$q(\lambda_B)$ характеризует режим работы и производительность (потребляемый расход воздуха) компрессора

$$G_B = \frac{m_g \cdot p_B^* \cdot F_B \cdot q(\lambda_B)}{\sqrt{T_B^*}}.$$

$G_{B.пр}$ - приведенный расход воздуха в сечении на входе в компрессор

$$G_{B.пр} = \frac{m_g \cdot 101325 \cdot F_B \cdot q(\lambda_B)}{\sqrt{288}} \approx 241 \cdot F_B \cdot q(\lambda_B) \sim q(\lambda_B), \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

$q(\lambda_K)$ - относительная плотность тока в сечении на выходе из компрессора.

$q(\lambda_K)$ характеризует пропускную способность сети за компрессором (камеры сгорания, системы отборов воздуха, следующего каскада компрессора).

π_K^* - степень повышения давления в компрессоре.

Степень повышения давления в компрессоре π_K^* равна отношению полных давлений в сечениях на выходе и входе

$$\pi_K^* = \frac{p_K^*}{p_B}$$

n - частота вращения ротора, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ или %.

$n_{\text{пр.В}}$ - приведенная частота вращения ротора ($\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ или %) — частота вращения ротора, приведенная к стандартным условиям на входе в данный каскад компрессора.

Приведенная и «физическая» частоты вращения ротора связаны соотношением

$$n_{\text{пр.В}} = n \sqrt{\frac{288}{T_B^*}}$$

2.3.4. Критерии эффективности

$\eta_{\text{к}}^*$ - изоэнтропический коэффициент полезного действия компрессора.

Изоэнтропический коэффициент полезного действия компрессора (КПД компрессора) равен отношению значений идеальной $L_{\text{кS}}$ и действительной $L_{\text{к}}$ удельных работ компрессора, соответствующих одной и той же степени повышения давления $\pi_{\text{к}}^*$:

$$\eta_{\text{к}}^* = \frac{L_{\text{кS}}}{L_{\text{к}}} .$$

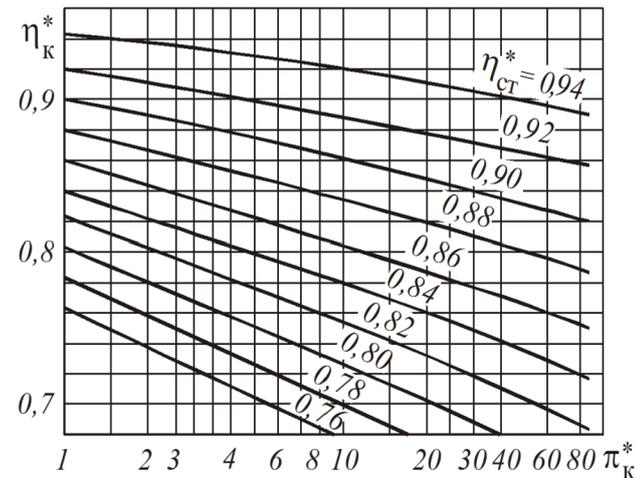
$\eta_{п.к}^*$ - политропический коэффициент полезного действия компрессора.

Как известно из курса лопаточных машин, изоэнтروпический КПД компрессора меньше его политропического КПД (КПД его ступеней) и определяется в зависимости от степени повышения давления π_K^* :

$$\eta_K^* = \frac{\left(\frac{k-1}{\pi_K^* k} - 1 \right)}{\left(\frac{k-1}{\pi_K^* k \cdot \eta_{п.к}^*} - 1 \right)}$$

$\eta_{п.к}^*$ зависит прежде всего от типа ступеней.

ТИП СТУПЕНИ	$\eta_{п.к}^* \left(\eta_{к.ст}^* \right)$	$\pi_{к.ст}^*$	$q(\lambda_B)$
Дозвуковая	0,88...0,92	1,15...1,35	0,70 ... 0,80
Транззвуковая	0,87...0,90	1,40...1,75	0,75 ... 0,90
Сверхзвуковая	0,83...0,86	>1,75	0,80 ... 0,92
Центробежная	0,76...0,80	2,5 ... 8,0	0,70 ... 0,85



Дозвуковые ступени, обеспечивающие наиболее высокие значения КПД, применяются в компрессорах двигателей, предназначенных для пассажирских, транспортных и других самолетов, для которых первостепенное значение имеет высокая топливная эффективность.

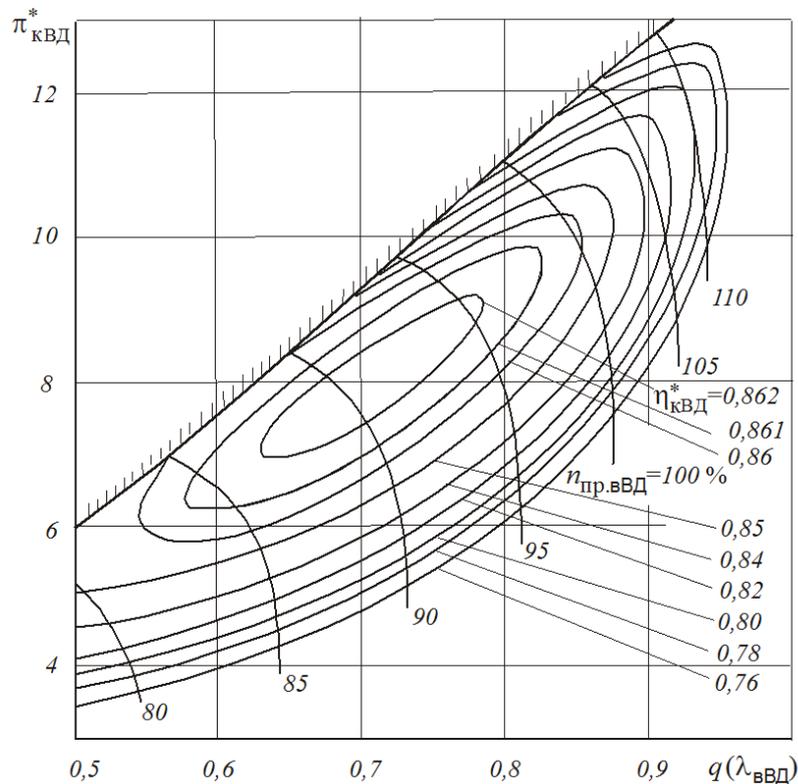
Трансзвуковые и особенно сверхзвуковые ступени с более высокой степенью повышения давления и производительностью, но с более низким КПД, применяются в качестве первых ступеней компрессоров, например в качестве ступени вентилятора ТРДД, что позволяет уменьшить их габариты и массу.

Малоразмерные компрессоры с расходом воздуха на взлетном режиме $G_{В.0} < 5 \dots 10 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ имеют КПД на 1...5 % меньше.

Если проектный расчет выполняется для взлетного режима, то для двигателей сверхзвуковых самолетов КПД компрессора необходимо занижать на 2...5 %, так как в этих условиях режим работы компрессора существенно отличается от расчетного.

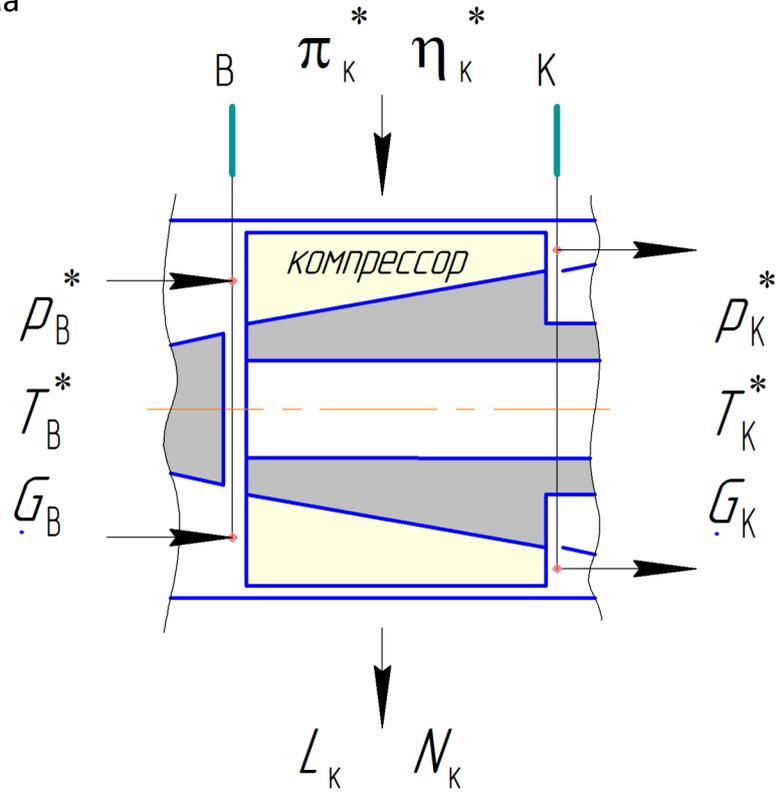
Зависимость степени повышения давления $\pi_{\text{к}}^*$ и КПД $\eta_{\text{к}}^*$ от плотности тока на входе в компрессор $q(\lambda_{\text{в}})$ и приведенной частоты вращения ротора $n_{\text{пр.в}}$ называют **характеристикой компрессора**.

Пример характеристики компрессора высокого давления



2.3.5. Расчет рабочего процесса

Расчетная схема



Идеальный процесс сжатия:

$$\Delta i_s^* = L_{KS} = i_{KS}^* - i_B^* = c_{p\theta} (T_{KS}^* - T_B^*);$$

$$L_{KS} = c_{p\theta} \cdot T_B^* \left(\frac{T_{KS}^*}{T_B^*} - 1 \right);$$

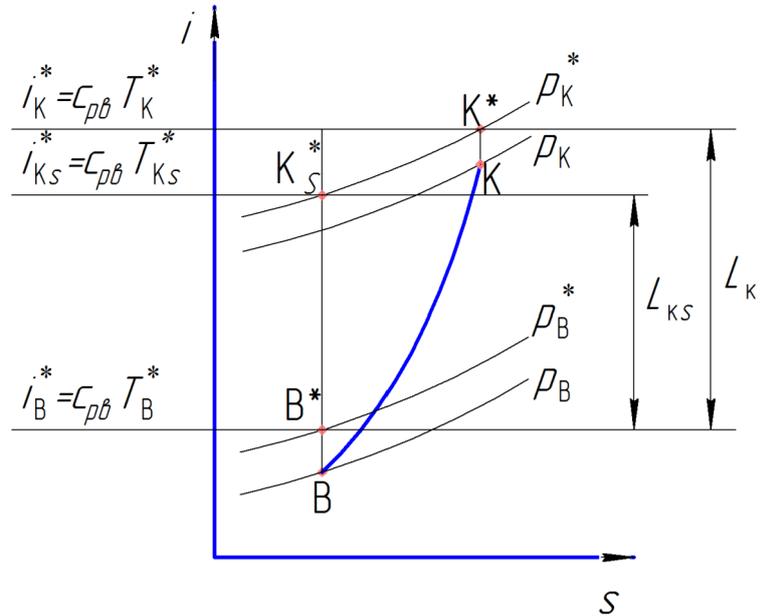
$$L_{KS} = c_{p\theta} \cdot T_B^* \left(\left(\frac{p_K^*}{p_B^*} \right)^{\frac{k_\theta - 1}{k_\theta}} - 1 \right);$$

$$L_{KS} = c_{p\theta} \cdot T_B^* \left(\pi_K^* \frac{k_\theta - 1}{k_\theta} - 1 \right).$$

Действительный процесс сжатия:

$$\Delta i^* = L_K = i_K^* - i_B^* = c_{p\theta} (T_K^* - T_B^*);$$

$$L_K = \frac{L_{KS}}{\eta_K^*}.$$



i-s диаграмма процесса сжатия

Расчет параметров компрессора

Удельная работа компрессора:

$$L_{\text{к}} = c_{\text{pv}} \cdot T_{\text{в}}^* \left(\pi_{\text{к}}^{\frac{k_{\text{г}} - 1}{k_{\text{г}}}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{к}}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Полная температура рабочего тела на выходе:

$$T_{\text{к}}^* = T_{\text{в}}^* + \frac{L_{\text{к}}}{c_{\text{pv}}}, \text{ К}.$$

Полное давление рабочего тела на выходе:

$$p_{\text{к}}^* = p_{\text{в}}^* \cdot \pi_{\text{к}}^*, \text{ Па}.$$

Расход рабочего тела на выходе:

$$G_{\text{к}} = G_{\text{в}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Мощность, потребляемая компрессором:

$$N_{\text{к}} = G_{\text{в}} \cdot L_{\text{к}}, \text{ Вт}.$$

2.3.6. Особенности расчета рабочего процесса вентилятора ТРДД

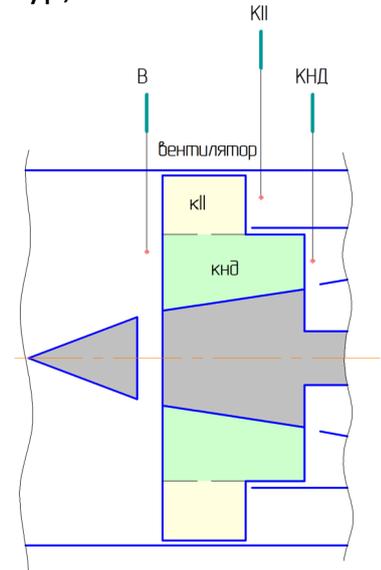
Расчет рабочего процесса вентилятора ТРДД складывается из расчета рабочего процесса двух компрессоров:

- **кнд** — совокупность «внутренней» части вентилятора и подпорных ступеней (при их наличии), которые сжимают воздух, поступающий во внутренний контур;
- **кII** — «внешняя» часть вентилятора, которая сжимает воздух, поступающий в наружный контур;

Каждый из компрессоров характеризуется соответствующими величинами степени повышения давления и КПД, которые в общем случае могут отличаться.

Соотношение расходов воздуха через наружный и внутренний контуры задается величиной степени двухконтурности $m = G_{II} / G_I$.

Мощность, потребляемая вентилятором, равна сумме мощностей кнд и кII: $N_B = N_{кнд} + N_{кII}$.



Расчетная схема