



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 4. Основные закономерности рабочего процесса ГТД

§ 4.3. Эффективный КПД

4.3.1. Понятие эффективного КПД

Эффективный КПД η_e газотурбинного двигателя - это отношение работы цикла L_e к располагаемой энергии внесенного в двигатель топлива Q_0 :

$$\eta_e = \frac{L_e}{Q_0} = \frac{G_{\text{ВІ}} \cdot L_e}{G_{\text{ВІ}} \cdot Q_0} = \frac{G_{\text{ВІ}} \cdot L_e}{G_m \cdot H_u}.$$

Эффективный КПД показывает, какая часть располагаемой энергии топлива преобразуется в полезную работу и, следовательно, характеризует двигатель как тепловую машину.

Располагаемая энергия внесенного в двигатель топлива Q_0 , приходящегося на 1 кг воздуха, связана с теплом Q_1 , подведенным к 1 кг воздуха, через коэффициент полноты сгорания топлива $\eta_r = Q_1/Q_0$, поэтому

$$\eta_e = \frac{L_e}{Q_0} = \frac{Q_1 \cdot L_e}{Q_1 \cdot Q_0} = \eta_r \frac{L_e}{Q_1}.$$

Умножим числитель и знаменатель полученной формулы на работу идеального цикла L_{es} и, пренебрегая различием Q_1 и Q_{1s} (тепло, подведенное в действительном и идеальном циклах), представим выражение для η_e в приближенном виде:

$$\eta_e = \eta_r \frac{L_e}{Q_1} = \eta_r \frac{L_{es}}{L_{es}} \frac{L_e}{Q_1} \approx \eta_r \frac{L_{es}}{L_{es}} \frac{L_e}{Q_{1s}} \approx \eta_r \cdot \eta_t \cdot \eta_{rI},$$

где $\eta_t = L_{es}/Q_{1s} \approx L_{es}/Q_1$ – термический КПД идеального цикла;

$\eta_{rI} = L_e/L_{es}$ – коэффициент гидравлических потерь в основном контуре двигателя.

Термический КПД η_t показывает, какую часть от подведенного тепла составляет работа идеального цикла.

Он учитывает потери тепла Q_{2s} , обусловленные несовершенством идеального цикла Брайтона:

$$\eta_t = L_{es} / Q_{1s} = 1 - Q_{2s} / Q_{1s}.$$

Если в формулу подставить Q_{1s} и Q_{2s} , выраженные через параметры цикла,

$$Q_{1s} = c_p (T_{\Gamma}^* - T_{Ks}^*) = c_p \left(T_{\Gamma}^* - T_{H} \cdot \pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}} \right); \quad Q_{2s} = c_p (T_{Cs} - T_{H}) = c_p \left(T_{\Gamma}^* \frac{1}{\pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}}} - T_{H} \right),$$

то получим

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Термический КПД η_t однозначно определяется суммарной степенью повышения давления в цикле π_{Σ} .

Коэффициент гидравлических потерь в основном контуре двигателя η_{rI} показывает, какую часть от идеальной работы цикла составляет его эффективная (действительная) работа. Он учитывает работу, затраченную на преодоление гидравлических и газодинамических потерь в процессах сжатия, подвода тепла и расширения,

$$L_{rI} = L_{rcж} + L_{rp} = L_{es} - L_e :$$

$$\eta_{rI} = \frac{L_e}{L_{es}} = \frac{L_{es} - L_{rI}}{L_{es}} = 1 - \frac{L_{rI}}{L_{es}} .$$

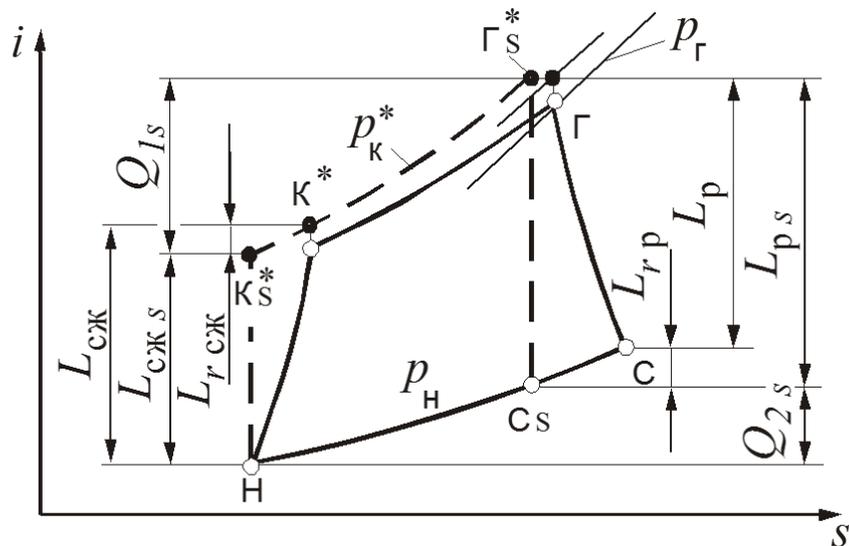


Рисунок — Сравнение идеального и действительного циклов

Эффективный КПД η_e является термическим КПД действительного цикла. Однако в отличие от термического КПД идеального цикла η_t он учитывает не только тепловые потери идеального цикла Q_{2s} , но и потери от неполного сгорания топлива, гидравлические и газодинамические потери в процессах сжатия, подвода тепла и расширения.

Эффективный КПД зависит от тех же параметров, от которых зависит работа цикла (T_{Γ}^* , π_{Σ} , $\eta_{сж}$, η_p и T_H), и, кроме того, от коэффициента полноты сгорания топлива η_{Γ} .

При одинаковых параметрах рабочего процесса и одинаковом уровне потерь три основных типа ГТД не отличаются друг от друга по величине работы цикла и подведенного тепла. Следовательно, они не отличаются и по эффективному КПД:

$$\eta_{e\text{ТРД}} = \eta_{e\text{ТРДД}} = \eta_{e\text{ТВД}}.$$

4.3.2. Зависимость эффективного КПД от температуры газа перед турбиной

Пусть температура газа перед турбиной изменяется $T_{\Gamma}^* = \text{var}$ при $\pi_{\Sigma} = \text{const}$, $\eta_{\text{сж}} = \text{const}$, $\eta_{\text{р}} = \text{const}$, $T_{\text{Н}} = \text{const}$ и $\eta_{\Gamma} = \text{const}$.

Если $T_{\Gamma}^* = T_{\Gamma \text{min}}^*$, то работа цикла равна нулю $L_e = 0$, а подведенное тепло больше нуля $Q_1 > 0$. Следовательно эффективный КПД также равен нулю $\eta_e = 0$. В этом случае все подведенное тепло идет на преодоление потерь.

С ростом температуры газа перед турбиной $T_{\Gamma}^* \uparrow$ увеличивается работа цикла $L_{e\text{с}} \uparrow$ (а также $L_{e\text{т}} \uparrow$), что приводит к повышению коэффициента $\eta_{\text{рI}} \uparrow = 1 - \frac{L_{\text{рI}}}{L_{e\text{с}} \uparrow}$ (так как величину $L_{\text{рI}}$ с некоторыми допущениями принять постоянной) и, следовательно, эффективного КПД $\eta_e \uparrow \approx \eta_{\Gamma} \cdot \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{рI}} \uparrow$.

Если T_{Γ}^* стремится к бесконечности, то коэффициент η_{rI} стремится к пределу, равному КПД процесса расширения η_p , а η_e к произведению трех величин: термического КПД η_t , КПД процесса расширения η_p и коэффициента полноты сгорания топлива η_r .

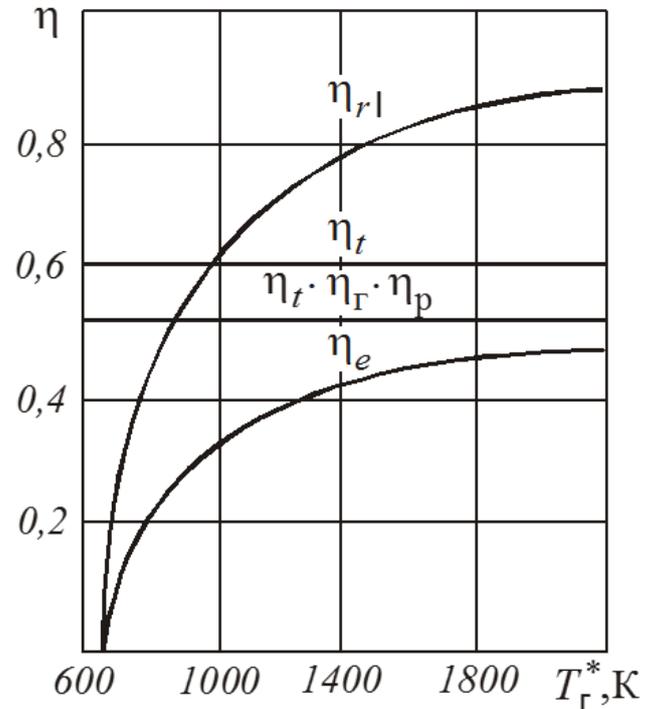


Рисунок — Зависимости коэффициента гидравлических потерь η_{rI} и эффективного КПД η_e от T_{Γ}^*

4.3.3. Зависимость эффективного КПД от суммарной степени повышения давления

Рассмотрим зависимость эффективного КПД η_e от суммарной степени повышения давления $\pi_\Sigma = \text{var}$ при условии, что другие параметры неизменны: $T_\Gamma^* = \text{const}$, $\eta_{\text{сж}} = \text{const}$, $\eta_p = \text{const}$, $T_H = \text{const}$ и $\eta_r = \text{const}$.

При $\pi_\Sigma = 1$ и $\pi_\Sigma = \pi_{\Sigma\text{пр}}$ эффективный КПД равен нулю $\eta_e = 0$, так как работа цикла равна нулю $L_e = 0$, а подведенное тепло $Q_1 > 0$. Следовательно, в диапазоне значений π_Σ от 1 до $\pi_{\Sigma\text{пр}}$ эффективный КПД должен иметь максимум.

В указанном диапазоне эффективный КПД η_e изменяется в соответствии с изменением произведения $(\eta_t \cdot \eta_{rI})$. С увеличением суммарной степени повышения давления $\pi_\Sigma \uparrow$ термический КПД монотонно увеличивается $\eta_t \uparrow$. Коэффициент η_{rI} изменяется так же, как и работа идеального цикла, то есть имеет максимум при оптимальной степени повышения давления $\pi_\Sigma = \pi_{\Sigma\text{opt}}$.

С повышением π_{Σ} от 1 до $\pi_{\Sigma opt}$ эффективный КПД увеличивается $\eta_e \uparrow$, так как увеличиваются термический КПД $\eta_t \uparrow$ и коэффициент $\eta_{rI} \uparrow$.

В диапазоне значений π_{Σ} , близких к $\pi_{\Sigma opt}$, эффективный КПД продолжает расти $\eta_e \uparrow$ вследствие повышения термического КПД, при этом величина коэффициента гидравлических потерь в основном контуре двигателя сохраняется примерно постоянной $\eta_{rI} \approx const$. Максимум η_e достигается при $\pi_{\Sigma} = \pi'_{\Sigma}$.

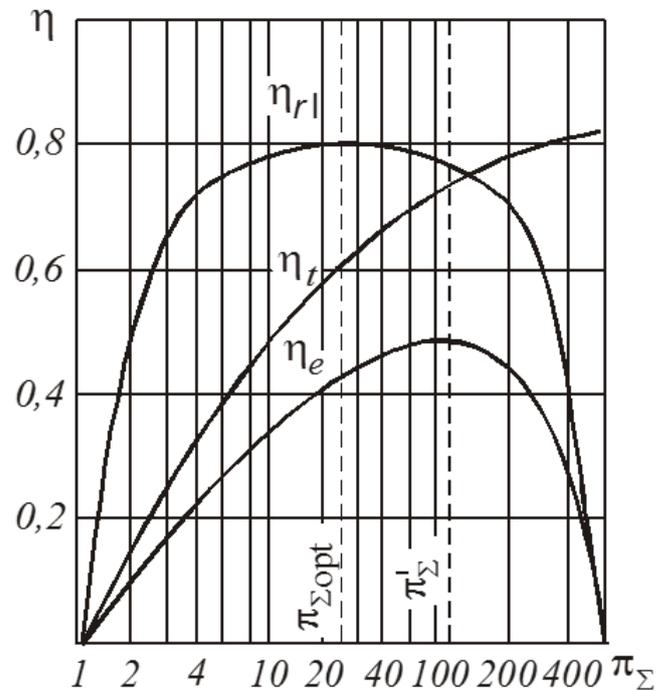


Рисунок - Зависимости термического КПД η_t , коэффициента гидравлических потерь η_{rI} и эффективного КПД η_e от π_{Σ}

Таким образом, степень повышения давления π'_{Σ} , при которой эффективный КПД η_e становится максимальным, больше величины $\pi_{\Sigma opt}$.

При дальнейшем повышении π_{Σ} в диапазоне от π'_{Σ} до $\pi_{\Sigma пр}$ эффективный КПД снижается $\eta_e \downarrow$ из-за уменьшения коэффициента $\eta_{rI} \downarrow$.

Наличие максимума эффективного КПД η_e объясняется противоположным влиянием двух факторов:

- ростом работоспособности рабочего тела с увеличением π_{Σ} (ростом термического КПД);
- уменьшением коэффициента гидравлических потерь в основном контуре двигателя η_{rI} вследствие снижения количества подведенного тепла при высоких значениях суммарной степени повышения давления.

В конечном счете возникновение максимума эффективного КПД η_e объясняется влиянием факторов, которые обуславливают максимум работы цикла L_e .

Величина π'_{Σ} , как и $\pi_{\Sigma opt}$, зависит от степени повышения температуры $(T_{\Gamma}^*/T_{\text{Н}})$ и от потерь в цикле. С увеличением температуры газа перед турбиной от 1000 до 2000 К величина π'_{Σ} увеличивается от 20 до 150 при принятом уровне потерь, что в 2 – 4 раза превышает оптимальную степень повышения давления $\pi_{\Sigma opt}$. В результате максимальный эффективный КПД увеличивается от $\eta_e \approx 0,33$ до $\eta_e \approx 0,53$.

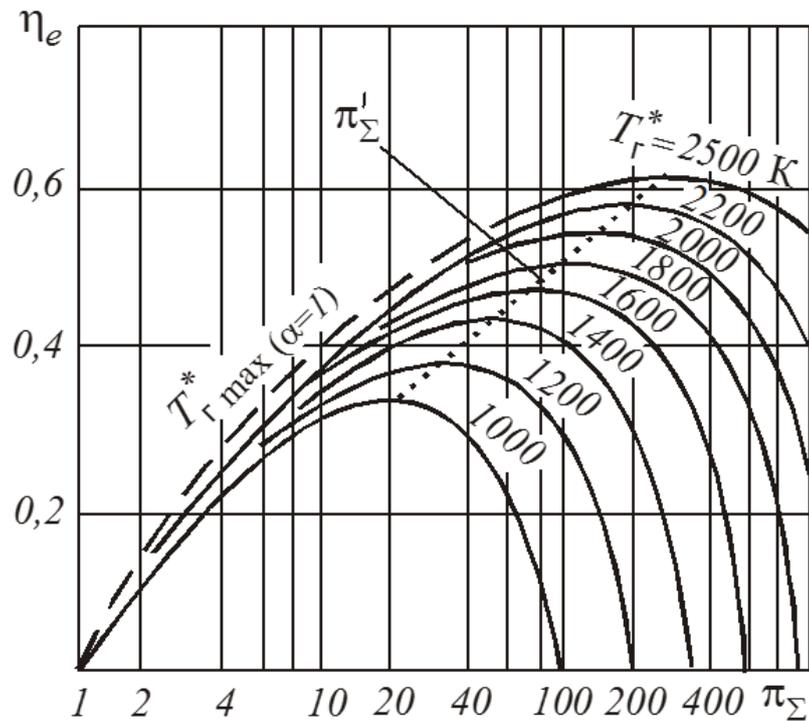


Рисунок - Зависимости эффективного КПД от π_{Σ} при различных T_{Γ}^*