



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

§ 4.2. Работа цикла ГТД

4.2.1. Физический смысл работы цикла

В термодинамике **работой цикла** (удельной работой цикла) L_e называют полезно используемое тепло, то есть разность между теплом, подведенным к 1 кг рабочего тела и отведенным от него:

$$L_e = Q_1 - Q_2 = L_p - L_{сж}.$$

Выражая L_p и $L_{сж}$ через кинетическую энергию потока и работу узлов, получаем

$$L_e = \left(L_T + \frac{c_C^2}{2} \right) - \left(\frac{V_{\Pi}^2}{2} + L_K \right) = \frac{c_C^2}{2} - \frac{V_{\Pi}^2}{2} + L_{T\Pi},$$

где $L_{T\Pi} = L_T - L_K$ – **избыточная работа турбины**.

Работа цикла ГТД складывается из приращения кинетической энергии рабочего тела, проходящего через основной контур двигателя $\left(\frac{c_C^2}{2} - \frac{V_{\Pi}^2}{2} \right)$, и механической работы $L_{T\Pi}$.

Таким образом, с одной стороны работой цикла L_e называют полезно используемое тепло $(Q_1 - Q_2)$, с другой стороны - механическую энергию $\left(\frac{c_C^2}{2} - \frac{V_{\Pi}^2}{2} + L_{\text{тII}} \right)$.

На основании первого соотношения определяется величина работы цикла, а на основании второго определяется скорость истечения газа из двигателя, а следовательно и его тяга.

В **ТРДД** избыточная работа турбины передается в наружный контур, а в **ТВД** – на винт.

В **ТРД** механическая работа от двигателя не отводится ($L_{\text{тII}}=0$), и полезное тепло, численно равное работе цикла, идет целиком на приращение кинетической энергии рабочего тела $\left(\frac{c_C^2}{2} - \frac{V_{\Pi}^2}{2} \right)$.

В **ГД СТ** избыточная работа турбины равна работе цикла $L_e = L_{\text{тII}}$, так как тягой двигателя можно пренебречь ($c_C \approx V_{\Pi}$).

4.2.2. Вывод формулы работы цикла, выраженной через параметры цикла

Выразим работы расширения L_p и сжатия $L_{сж}$ через их идеальные значения, чтобы затем от отношения температур по уравнению изоэнтропы перейти к отношению давлений.

Отношение работ сжатия в идеальном и действительном процессах называют **суммарным КПД процесса сжатия**:

$$\eta_{сж} = \frac{L_{сжs}}{L_{сж}}.$$

Суммарный КПД процесса сжатия $\eta_{сж}$ показывает, какую долю от величины $L_{сж}$ составляет идеальная работа $L_{сжs}$, затраченная на сжатие воздуха без потерь при одинаковой суммарной степени повышения давления π_{Σ} в обоих случаях, и оценивает потери в процессе сжатия воздуха в воздухозаборнике и компрессоре.

Величина $\eta_{сж}$ зависит от степени совершенства воздухозаборника и компрессора, скорости полета, от суммарной степени повышения давления и может изменяться в широких пределах. Для дозвуковых и небольших сверхзвуковых скоростей полета $\eta_{сж} = 0,75 \dots 0,85$.

Отношение действительной работы расширения к ее значению в идеальном процессе называют **суммарным КПД процесса расширения**:

$$\eta_p = \frac{L_p}{L_{ps}}.$$

С помощью суммарного КПД расширения η_p учитываются потери в камере сгорания, турбине и в канале сопла. Величина η_p зависит от суммарной степени понижения давления π_Σ , степени совершенства камеры сгорания, турбины и сопла, а также от соотношения величин, характеризующих работу этих узлов, и изменяется обычно в пределах $\eta_p = 0,85 \dots 0,95$.

Выражая работы $L_{\text{сж}}$ и L_p , затраченные на сжатие и расширение, через их идеальные значения $L_{\text{сж}s}$ и $L_{p s}$, а их – через температуру начала и конца процесса, получаем

$$L_e = L_p - L_{\text{сж}} = L_{p s} \cdot \eta_p - L_{\text{сж}s} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}} = c_{p2} (T_{\Gamma}^* - T_{\text{Cs}}) \cdot \eta_p - c_{p6} (T_{\text{Ks}}^* - T_{\text{H}}) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}};$$

$$L_e = c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^* \left(1 - \frac{1}{T_{\Gamma}^*/T_{\text{Cs}}} \right) \cdot \eta_p - c_{p6} \cdot T_{\text{H}} \left(T_{\text{Ks}}^*/T_{\text{H}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}}$$

С учетом уравнения изоэнтропы получим

$$L_e = c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^* \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{\pi_{\Sigma}^{k_2}}} \right) \cdot \eta_p - c_{p6} \cdot T_{\text{H}} \left(\frac{k_6 - 1}{\pi_{\Sigma}^{k_6}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}},$$

где $\pi_{\Sigma} = p_{\text{K}}^*/p_{\text{H}}$ – суммарная степень повышения (понижения) давления в цикле, равная произведению степеней повышения давления во входном устройстве и компрессоре:

$$\pi_{\Sigma} = \pi_V \cdot \sigma_{\text{вх}} \cdot \pi_{\text{к}\Sigma}^*$$

Из полученного уравнения видно, что работа цикла L_e **зависит** от величин T_{Γ}^* , π_{Σ} , которые называют **параметрами рабочего процесса** или **параметрами цикла**, КПД процессов сжатия $\eta_{сж}$ и расширения η_p , а также от температуры наружного воздуха T_H .

Работа цикла **зависит** также от скорости полета V_{Π} , так как с её изменением изменяется степень повышения давления π_V и, следовательно, π_{Σ} .

Работа цикла **не зависит** от давления наружного воздуха p_H .

При одинаковых T_{Γ}^* , π_{Σ} , $\eta_{сж}$, η_p постоянной T_H работа цикла трех основных типов ГТД одинаковая:

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

Показатель изоэнтропы k_2 и удельная теплоемкость газа c_{p2} зависят от состава рабочего тела и его температуры. Однако диапазон их изменения несоизмерим с диапазоном изменения параметров цикла. Поэтому при качественном анализе изменение этих величин можно не учитывать, и при дальнейших аналитических преобразованиях будем полагать, что $k_2 = k_{\theta} = k$ и $c_{p2} = c_{p\theta} = c_p$.

4.2.3. Зависимость работы цикла от температуры газа перед турбиной

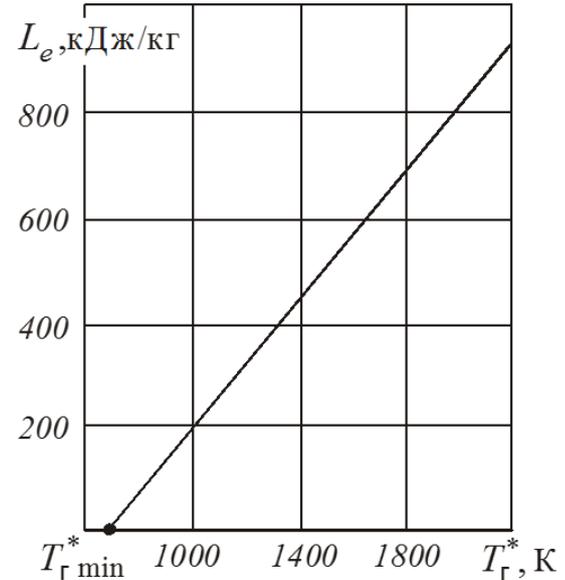
Пусть температура газа перед турбиной изменяется $T_{\Gamma}^* = \text{var}$ при $\pi_{\Sigma} = \text{const}$, $\eta_{\text{сж}} = \text{const}$, $\eta_{\text{p}} = \text{const}$ и $T_{\text{H}} = \text{const}$.

Из уравнения

$$L_e = c_{p2} \cdot T_{\Gamma}^* \left(1 - \frac{1}{\pi_{\Sigma}^{\frac{k_2-1}{k_2}}} \right) \eta_{\text{p}} - c_{p6} \cdot T_{\text{H}} \left(\frac{k_6-1}{k_6} \pi_{\Sigma} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{сж}}}$$

следует, что с увеличением температуры T_{Γ}^* работа расширения газа увеличивается пропорционально этой температуре, а работа сжатия от нее не зависит.

Поэтому работа цикла L_e изменяется по T_{Γ}^* линейно.



Зависимость L_e от T_{Γ}^*

При снижении T_{Γ}^* работа цикла уменьшается и при некоторой минимальной температуре $T_{\Gamma \min}^*$ обращается в нуль.

Из условия $L_e = 0$ при $k_2 = k_8 = k$ и $c_{p2} = c_{p8} = c_p$ получаем выражение для $T_{\Gamma \min}^*$:

$$T_{\Gamma \min}^* = T_H \cdot \pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{\eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p} = \frac{T_{Ks}^*}{\eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p}.$$

Величина $T_{\Gamma \min}^*$ зависит от суммарной степени повышения давления π_{Σ} , величины T_H и от потерь в цикле $\eta_{\text{сж}}$, η_p .

Для идеального цикла (при отсутствии гидравлических потерь в процессах сжатия и расширения $\eta_{\text{сж}} = 1$, $\eta_p = 1$) $T_{\Gamma \min}^* = T_{Ks}^*$. Следовательно, работа цикла равна нулю, когда температура газа перед турбиной равна температуре воздушного потока за компрессором и тепло к рабочему телу не подводится ($Q_{1 \min} = 0$).

Для действительного цикла минимальная температура газа перед турбиной $T_{\Gamma \min}^*$ выше температуры воздуха за компрессором

$$T_{\Gamma \min}^* > T_K^*,$$

так как

$$T_{\Gamma \min}^* = \frac{T_{Ks}^*}{\eta_{\text{СЖ}} \cdot \eta_p} > T_K^* = T_H + T_H \left(\pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{СЖ}}} = T_{Ks}^* \frac{1}{\eta_{\text{СЖ}}} - T_H \left(\frac{1}{\eta_{\text{СЖ}}} - 1 \right).$$

Следовательно, в действительном цикле тепло к рабочему телу подводится $Q_{1\min} > 0$. Так как работа цикла при этом равна нулю $L_e = 0$, то все подведенное тепло идет на преодоление гидравлических потерь и отводится от двигателя с выхлопными газами.

4.2.4. Зависимость работы цикла от суммарной степени повышения давления

Рассмотрим зависимость работы цикла L_e от суммарной степени повышения давления π_Σ при условии, что другие параметры неизменны: $T_\Gamma^* = \text{const}$, $\eta_{\text{сж}} = \text{const}$, $\eta_p = \text{const}$ и $T_H = \text{const}$.

Примем, что $k_2 = k_3 = k$ и $c_{p2} = c_{p3} = c_p$, и представим уравнение для L_e в виде

$$L_e = c_p \cdot T_H \left(1 - \frac{1}{\pi_\Sigma^{\frac{k-1}{k}}} \right) \eta_p \left[\frac{T_\Gamma^*}{T_H} - \pi_\Sigma^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{\eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p} \right].$$

Работа цикла равна нулю $L_e = 0$ в двух случаях:

при

$$\pi_\Sigma = 1$$

и при

$$\pi_\Sigma = \left(\frac{T_\Gamma^*}{T_H} \eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p \right)^{\frac{k}{k-1}} = \pi_{\Sigma \text{пр}}.$$

В первом случае давление в камере сгорания равно атмосферному, отсутствует перепад давления при расширении газа и **рабочее тело неработоспособно**, хотя тепло к газу подводится.

Во втором случае работоспособность газа высокая (большой перепад давления в процессе расширения), но подведенного тепла хватает только на преодоление потерь, то есть **цикл вырождается**. Это объясняется тем, что суммарная степень повышения давления достигает предельного значения $\pi_{\Sigma пр}$, при котором заданная температура становится минимальной

$$T_{\Gamma}^* = T_H \cdot \pi_{\Sigma пр}^{\frac{k-1}{k}} \frac{1}{\eta_{сж} \cdot \eta_p} = T_{\Gamma min}^* .$$

Снижение работы цикла до нуля при $T_{\Gamma}^* = T_{\Gamma min}^*$ и при $\pi_{\Sigma} = \pi_{\Sigma пр}$ имеет одинаковый физический смысл. В обоих случаях цикл вырождается вследствие уменьшения количества тепла, подведенного к рабочему телу. В первом случае теплоподвод уменьшается из-за снижения температуры газа перед турбиной, а во втором – из-за увеличения температуры воздуха на выходе из компрессора.

Так как работа цикла обращается в нуль при двух значениях π_{Σ} , а величина L_e всегда положительна, то она должна иметь максимум, соответствующий **оптимальной степени повышения давления** $\pi_{\Sigma\text{opt}}$.

Для определения $\pi_{\Sigma\text{opt}}$ введем переменную $e = \pi_{\Sigma}^{\frac{k-1}{k}}$ и найдем производную

$$\frac{\partial L_e}{\partial e} = \frac{\partial \left(c_p \cdot T_{\Gamma}^* \left(1 - \frac{1}{e} \right) \eta_p - c_p \cdot T_{\text{H}} (e-1) \frac{1}{\eta_{\text{сж}}} \right)}{\partial e} = \frac{c_p \cdot T_{\Gamma}^* \cdot \eta_p}{e^2} - \frac{c_p \cdot T_{\text{H}}}{\eta_{\text{сж}}}.$$

Приравняв ее нулю, получим

$$e_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{H}}} \eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p},$$

откуда

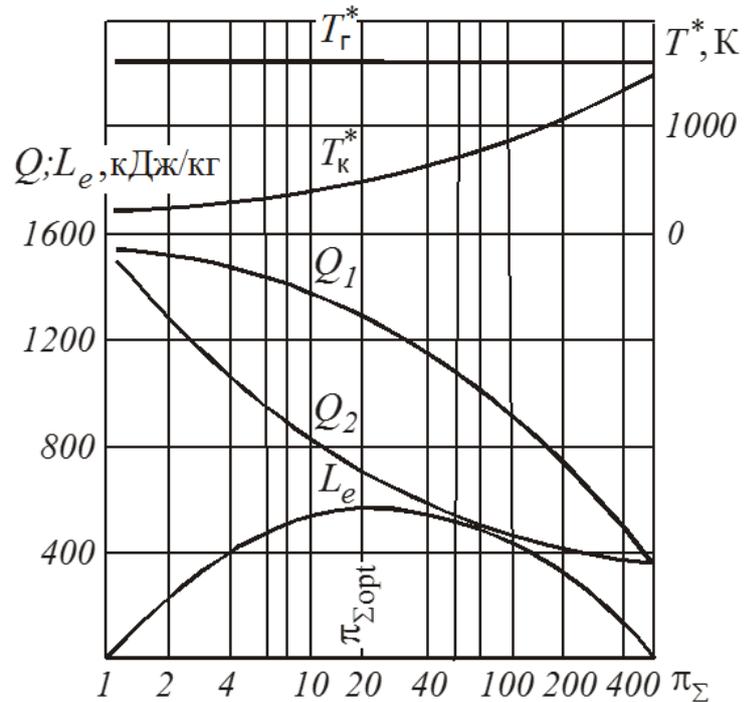
$$\pi_{\Sigma\text{opt}} = \sqrt{\left(\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{H}}} \eta_{\text{сж}} \cdot \eta_p \right)^{\frac{k}{k-1}}} = \sqrt{\pi_{\Sigma\text{пр}}}.$$

Оптимальная степень повышения давления $\pi_{\Sigma \text{opt}}$, как и величина $\pi_{\Sigma \text{пр}}$, является функцией степени повышения температуры рабочего тела $(T_{\Gamma}^*/T_{\text{H}})$ и потерь в цикле ($\eta_{\text{сж}}$ и $\eta_{\text{р}}$). Чем больше подведено тепла и меньше потери, тем больше величина $\pi_{\Sigma \text{opt}}$.

При заданной скорости полета $V_{\text{п}}$ и, соответственно, величине π_{V} оптимальной степень повышения давления $\pi_{\Sigma \text{opt}}$ соответствует оптимальная степень повышения давления компрессора

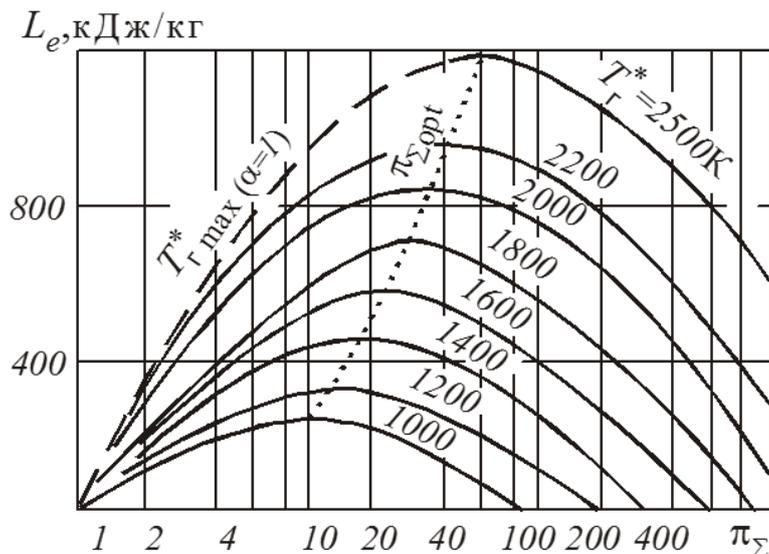
$$\pi_{\text{кopt}} = \frac{\pi_{\Sigma \text{opt}}}{\pi_{\text{V}} \cdot \sigma_{\text{вх}}}.$$

С увеличением π_{Σ} работа цикла сначала возрастает, достигая максимума, а затем снижается. Возникновение максимума работы цикла объясняется противоположным влиянием двух факторов: ростом работоспособности рабочего тела (ростом избыточного давления в камере сгорания, что приводит к уменьшению потерь тепла Q_2) и одновременным снижением количества подведенного тепла Q_1 вследствие повышения температуры воздуха за компрессором. Вначале, при малых значениях π_{Σ} , преобладает влияние первого фактора, а затем – второго.



Зависимость L_e от π_{Σ}

Для значительного увеличения работы цикла необходимо изменять не только температуру газа перед турбиной T_{Γ}^* , но и суммарную степень повышения давления π_{Σ} . Например, с увеличением температуры T_{Γ}^* от 1000 до 2000 К оптимальная степень повышения давления $\pi_{\Sigma opt}$ увеличивается от 10 до 40, а работа цикла L_e – от 210 до 830 кДж/кг, то есть. в 4 раза.



Зависимость L_e от π_{Σ} и T_{Γ}^*