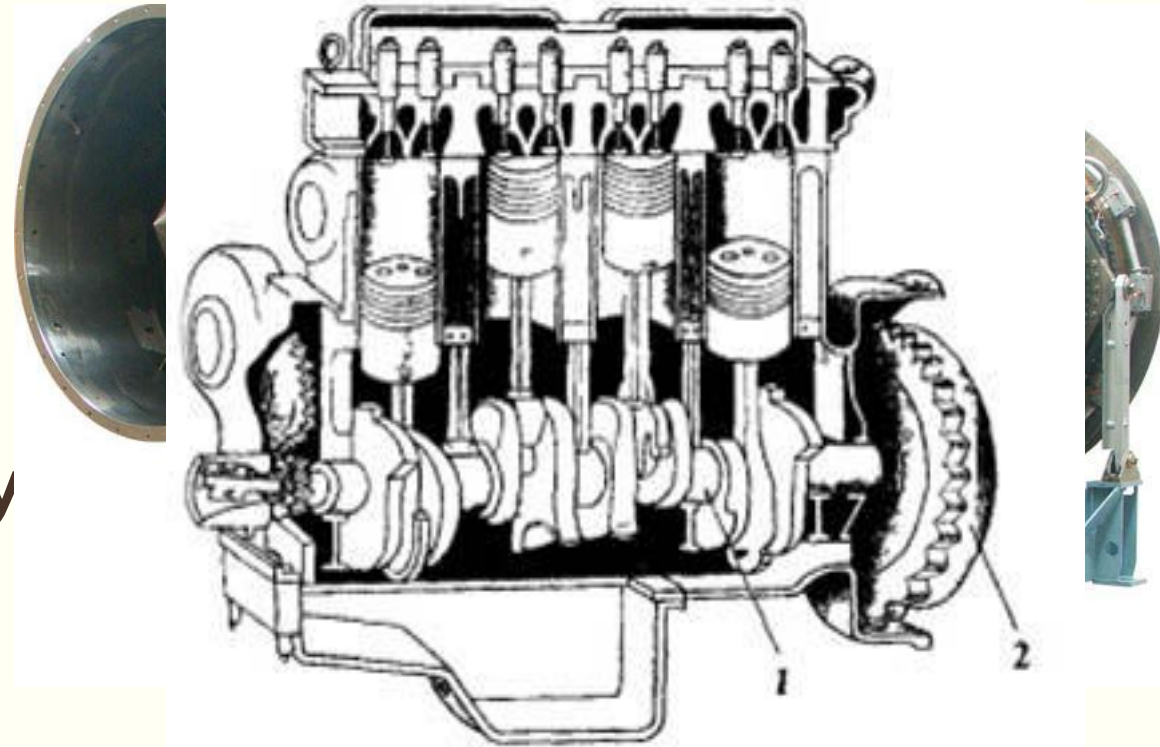


**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО  
СГОРАНИЯ (ДВС) И  
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК (ГТУ)**



# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КРУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

---

- ✓ **Круговыми процессами (циклами) тепловых машин** называются замкнутые процессы, в которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.
- ✓ В основе теории круговых процессов лежит **первое начало термодинамики (внешний баланс)** :

$$\delta Q^* = dU + \delta L^*$$
$$\oint \delta Q^* = \oint dU + \oint \delta L^* = |Q_1^*| - |Q_2^*| = L_{12}^*$$

- ✓ **где**  $Q_1^*$  - тепло подводимое от внешнего источника высших температур, [Дж] ;  $Q_2^*$  - тепло, которое отдается источнику низших температур [Дж] ;  $L_{12}^*$  - полученная в тепловом двигателе работа, [Дж].
- ✓ **Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя** называется величина отношения полученной работы к затраченному количеству тепла:

$$\eta = \frac{|L^*|}{|Q_1^*|} = 1 - \frac{|Q_2^*|}{|Q_1^*|}$$

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КРУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

---

- ✓ В соответствии со следствием II второго начала термостатики КПД термодинамического цикла теплового двигателя не зависит от вида цикла, природы рабочего тела цикла, а определяется лишь в зависимости от соотношения средних абсолютных температур рабочего тела в процессах сообщения ( $T_{m,1}$ ) и отъема тепла ( $T_{m,2}$ ):

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{m,2}}{T_{m,1}}$$

- ✓ Круговые процессы тепловых машин наиболее наглядно изображаются в координатах P-V (универсальных координатах работы) и в координатах T-S (универсальных координатах приведенного теплообмена).

# ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВС

---

Рабочее тело

Идеальный газ, имеющий постоянные значения массового расхода и теплоемкостей во всех стадиях цикла

Различают следующие термодинамические циклы поршневых ДВС

С подводом тепла при  $V = \text{idem}$  (цикл Отто)

С подводом тепла при  $P = \text{idem}$  (цикла Дизеля)

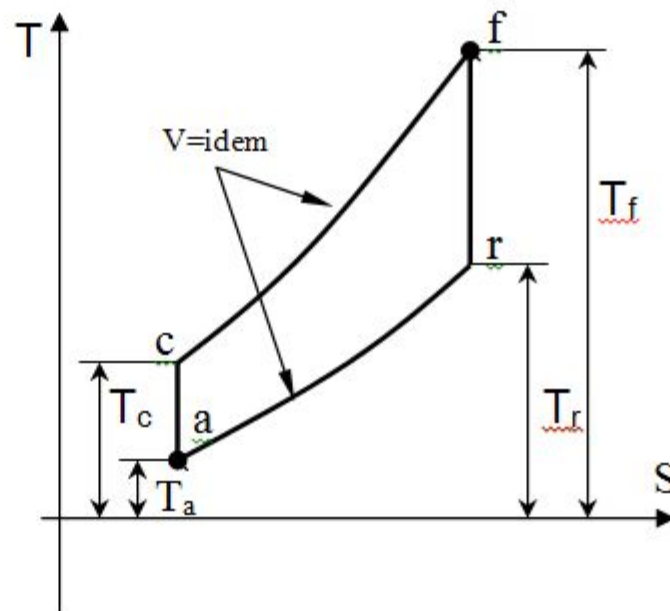
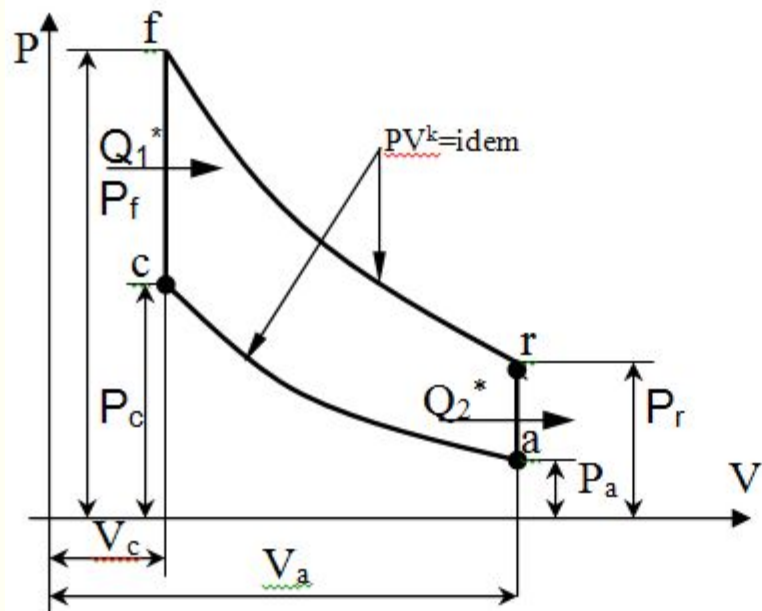
Со смешанным подводом тепла: при  $P = \text{idem}$  и затем при  $V = \text{idem}$  (Цикл Тринклера)

При этом, принимают, что

Отсутствуют необратимые потери тепла и работы

Процесс горения заменяется подводом тепла к рабочему телу от нагревателя, а процесс же охлаждения продуктов сгорания, заменяется процессом отвода тепла от рабочего тела к холодильнику

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ОТТО С ПОДВОДОМ ТЕПЛА (при $V = \text{idem}$ )



Термический КПД цикла Отто

$$\eta_t = 1 - \frac{|Q_2^*|}{|Q_1^*|} = 1 - \frac{c_v(T_r - T_a)}{c_v(T_f - T_c)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

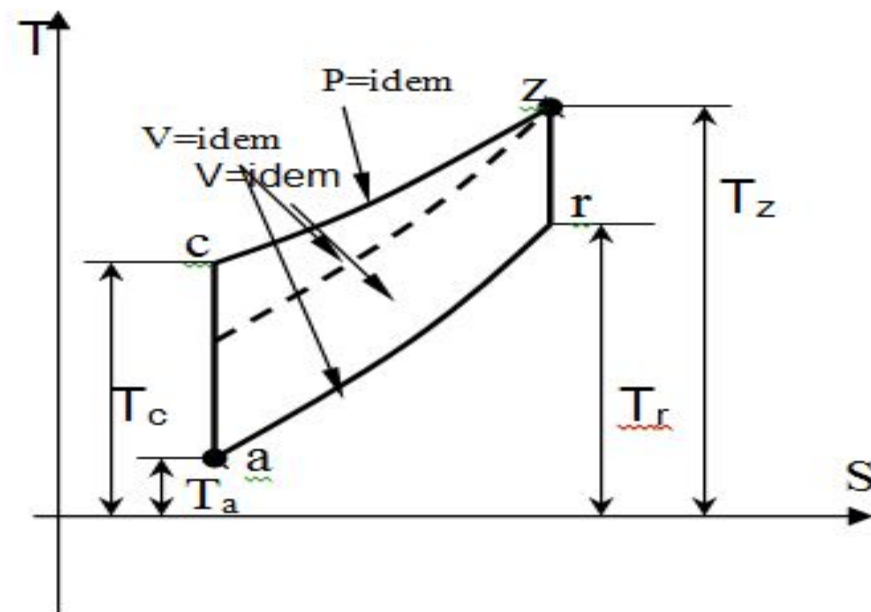
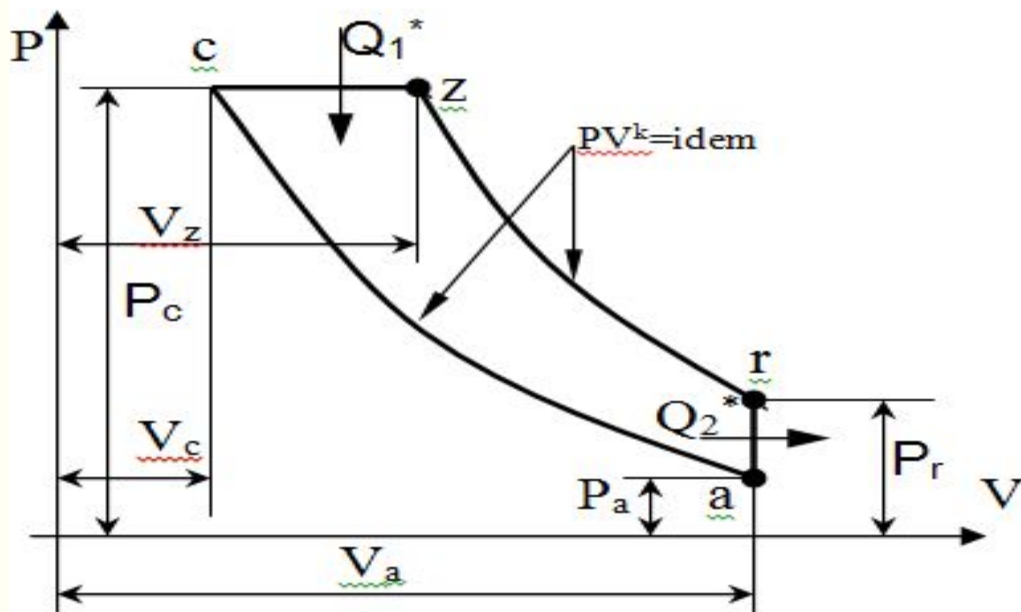
ГДЕ  $\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$  - степень сжатия

k- показатель адиабаты

Основные процессы:

- а-с: адиабатное сжатие топливно – воздушной смеси;
- с-ф: изохорный подвод теплоты при сгорании топлива;
- ф-г: адиабатическое расширение
- г-а: отвод тепла в изохорическом процессе.

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ С ПОДВОДОМ ТЕПЛА (при $P=\text{idem}$ )



Основные процессы:

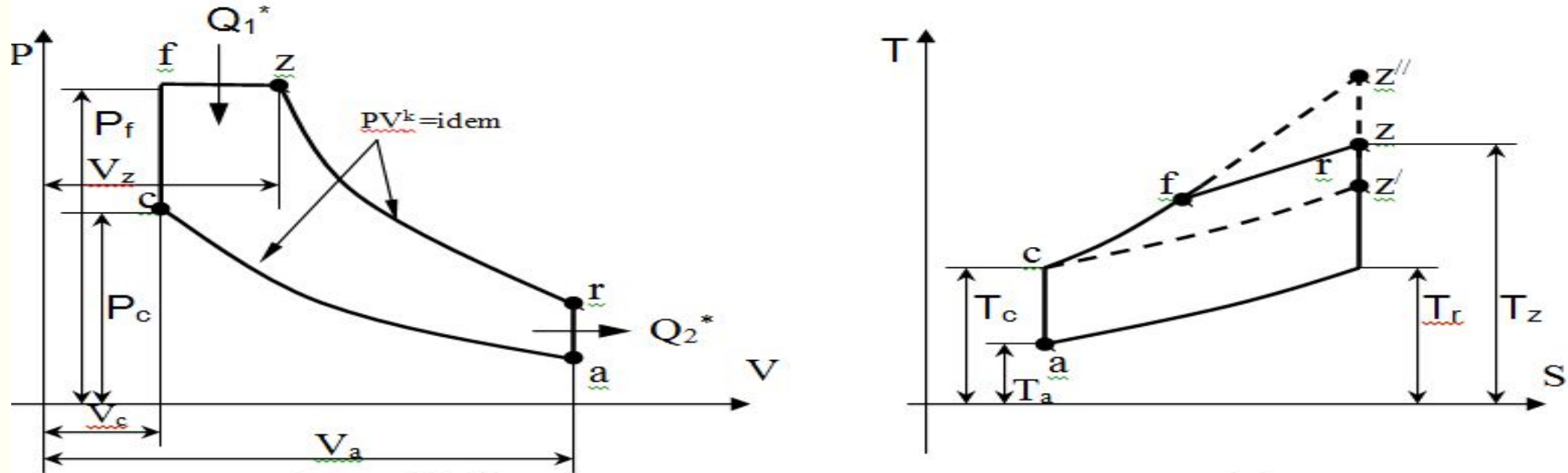
а-с: адиабатное сжатие воздуха;  
с-з: изобарный подвод тепла;  
з-г: адиабатическое расширение;  
г-а: отвод тепла в изохорическом процессе.

Термический КПД цикла Дизеля:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$$

где  $\rho = \frac{V_z}{V_c}$  - степень предварительного расширения при постоянном давлении.

# ТЕРМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ТРИНКЛЕРА СО СМЕШАННЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛА (при $V = idem$ и $P = idem$ )



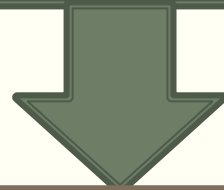
Термический КПД цикла со смешанным подводом тепла при  $V = idem$  и  $P = idem$  определяется по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}$$

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}$$

# ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Газотурбинная установка (ГТУ) является тепловым двигателем, в которой тепло за счет сгорания топлива в камере сгорания преобразуется в работу



Термодинамические циклы ГТУ различают

ЦИКЛ БРАЙТОНА ( $P=IDEM$ )

ЦИКЛ ГЕМФРИ ( $V=IDEM$ )

Рабочее тело в цикле ГТУ

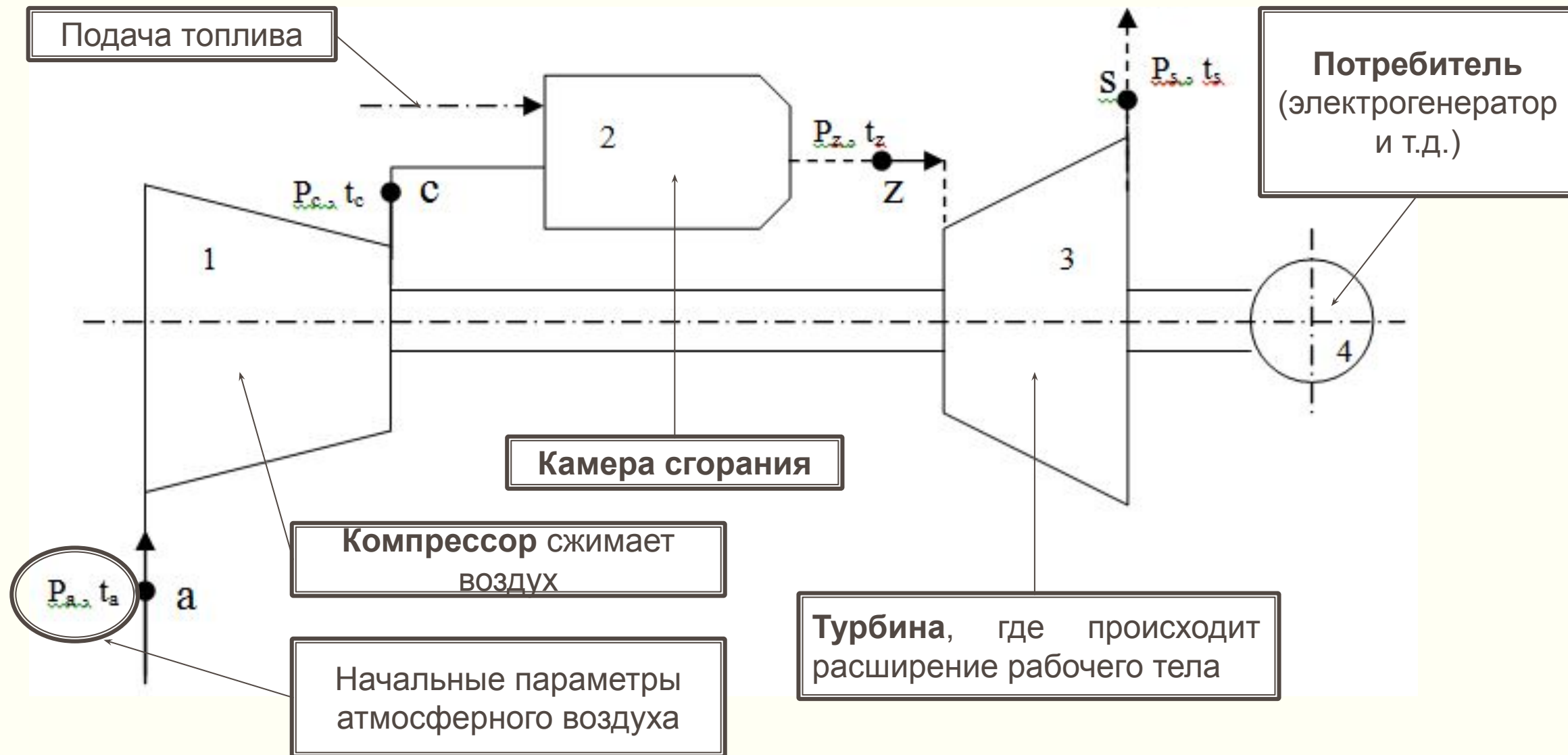
Атмосферный воздух

Смесь атмосферного воздуха с продуктами сгорания топлива

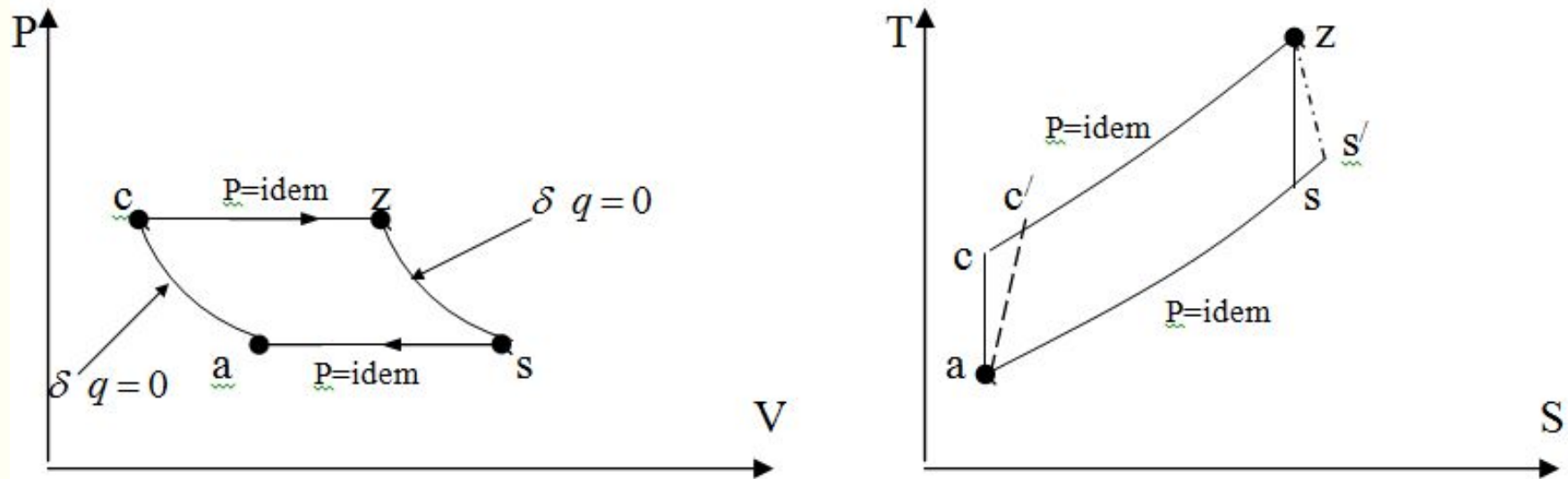
однокомпонентные газы (гелий, диоксид углерода и др.)



# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ БРАЙТОНА С ПОДВОДОМ ТЕПЛА (при $P=const$ )



# Схема и процесс ГТУ с подводом тепла при P=idem



- Работа адiabатического компрессора и турбины является работой сдвига в перетекании рабочего тела из области одного давления в область другого, поэтому удобно использовать уравнение первого начала термостатики для потока 1 кг газа:

$$h_c = |W_{a-c}| = h_c - h_a = C_{pm} (T_c - T_a) = C_{pm} T_c (1 - c^{-m})$$

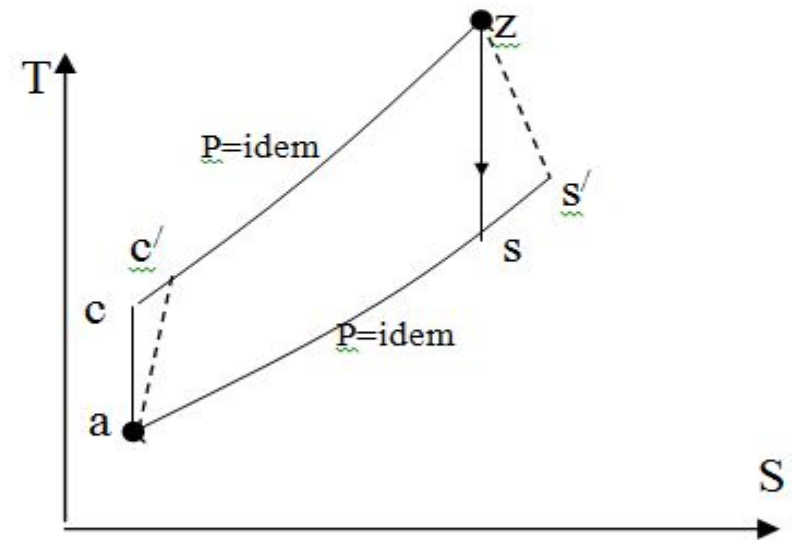
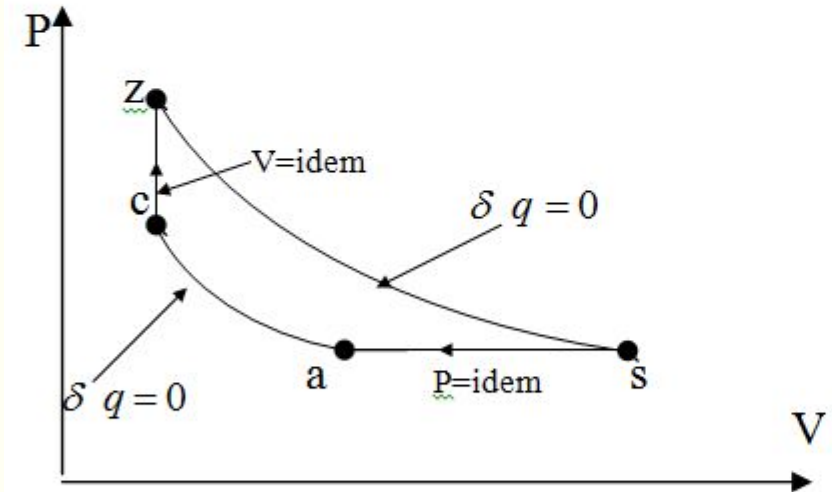
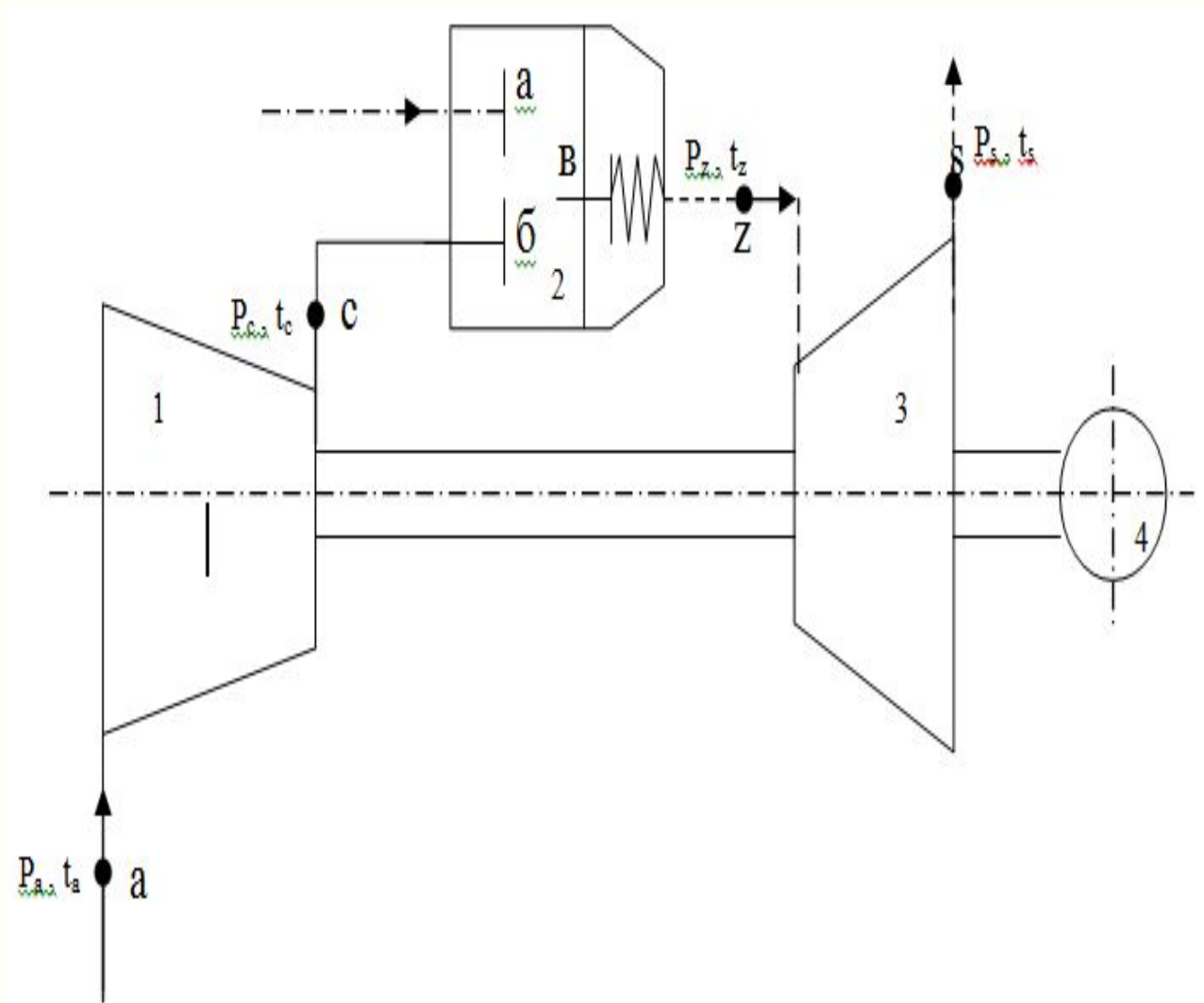
$$\delta q = dh + \delta w = dh - v dp$$

- Для процесса подвода тепла:  $h_z = W_{s-z} = h_z - h_s = C_{pm} (T_z - T_s) = C_{pm} T_z (1 - c^{-m})$

$$C = \frac{P_c}{P_a} = \frac{P_z}{P_s} = \frac{h_z}{h_c} = \frac{T_z}{T_c} = c^k$$

$k$  — средний показатель адиабатного процесса  
 $C$  — степень повышения давления в компрессоре,

# СХЕМА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ГЕМФРИ С ПОДВОДОМ ТЕПЛА (при $V=idem$ )



The image features a pair of vibrant red, textured curtains that are pulled back to reveal a stage. A bright spotlight illuminates a white rectangular sign in the center of the stage. The sign contains the Russian text "Спасибо за внимание!" in a bold, black, sans-serif font. The background behind the sign is a soft, out-of-focus light green, suggesting a stage backdrop. The overall composition is centered and symmetrical, creating a formal and professional atmosphere.

**Спасибо за  
внимание!**