

# Термодинамические основы работы теплоэнергетических установок

Схемы и циклы ГТУ



# Типы ГТУ

по способу  
сжигания  
топлива

$p = \text{const}$

$v = \text{const}$

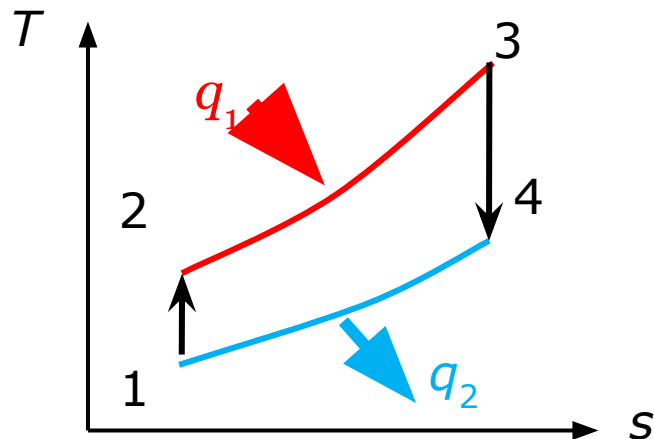
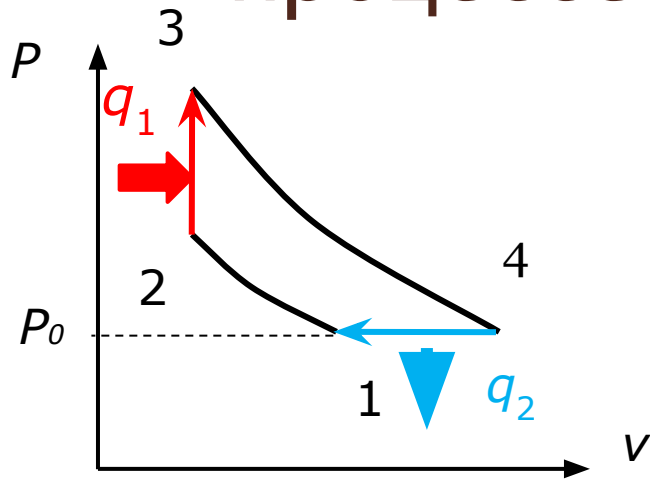
способ передачи теплоты  
холодному источнику

открытые

закрытые



# Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)



- 1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре
- 2-3 изохорный подвод теплоты ( $v=\text{const}$ )
- 3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине
- 4-1 изобарный отвод теплоты

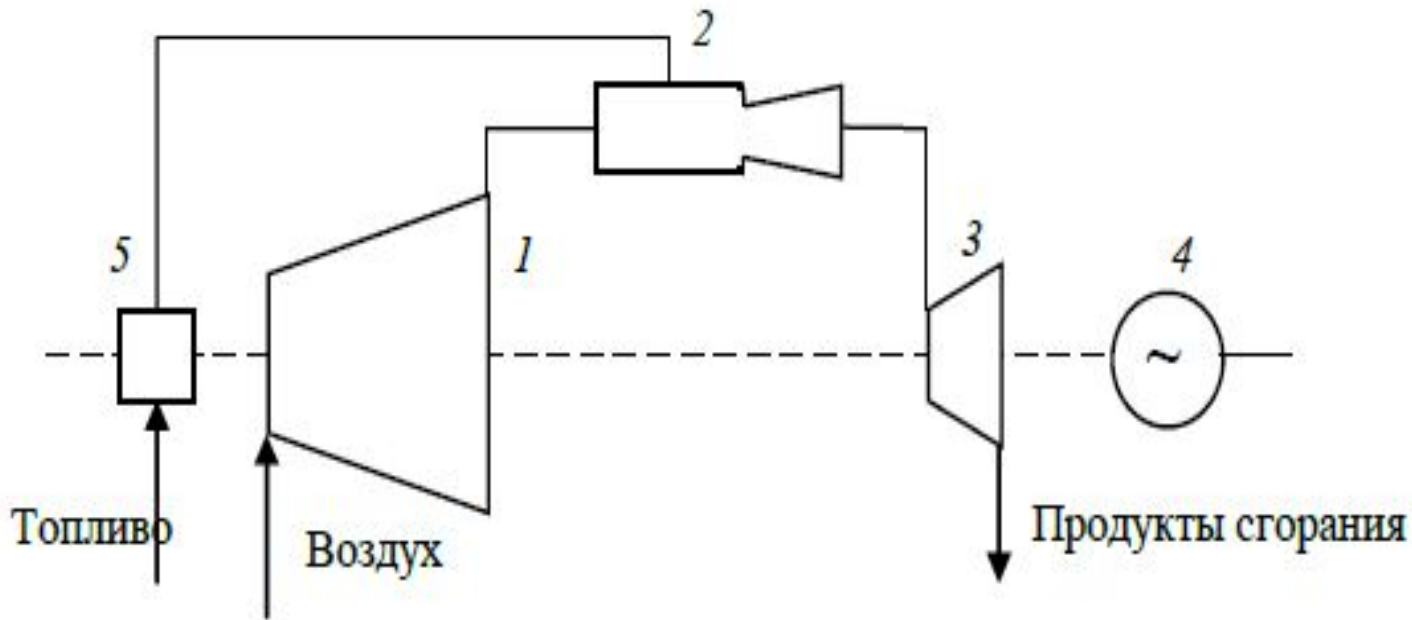
# Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $v=\text{const}$ (импульсная)

- $$\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$$

- $$\beta_{\text{пт}} = \frac{p_3}{p_2}$$

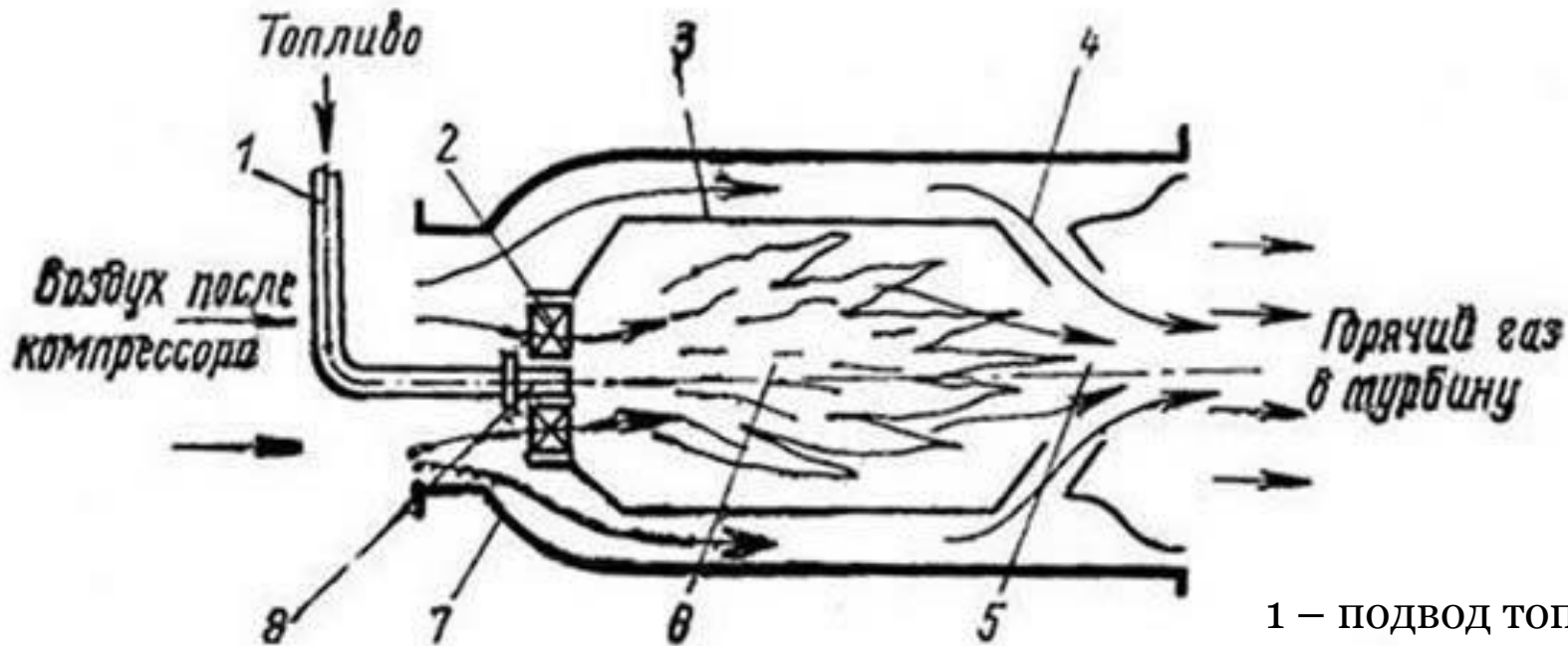
- $$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{(k-1)/k}} \frac{k(\beta_{\text{пт}}^{1/k} - 1)}{\beta_{\text{пт}} - 1}$$

# Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$



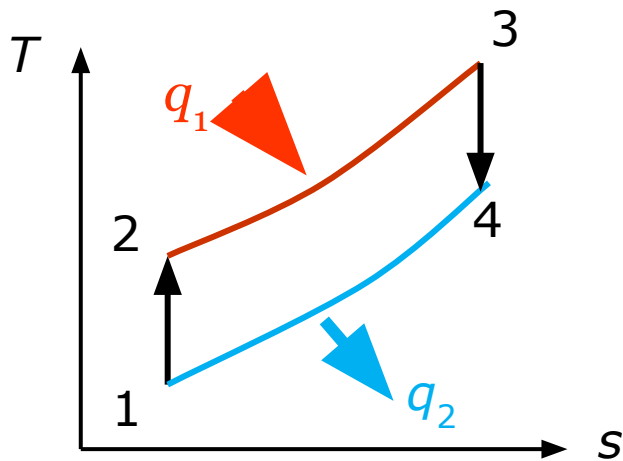
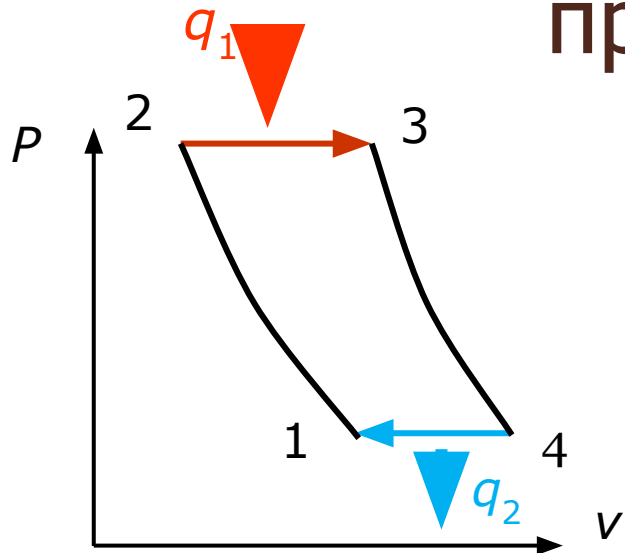
- 1 – компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 – топливный насос

# Простейшая камера сгорания ГТУ



- 1 – подвод топлива
- 2 – регистр
- 3 – пламенная труба
- 4 – смеситель
- 5 – зона смешения
- 6 – зона горения
- 7 – корпус
- 8 – топливораздающее устройство

# Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2-3 изобарный подвод теплоты ( $p=\text{const}$ )

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

4-1 изобарный отвод теплоты



## Характеристики цикла ГТУ с подводом теплоты в процессе $p=\text{const}$

- $\beta(\pi) = \frac{p_2}{p_1}$

- $\rho = \frac{v_3}{v_2}$

- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$

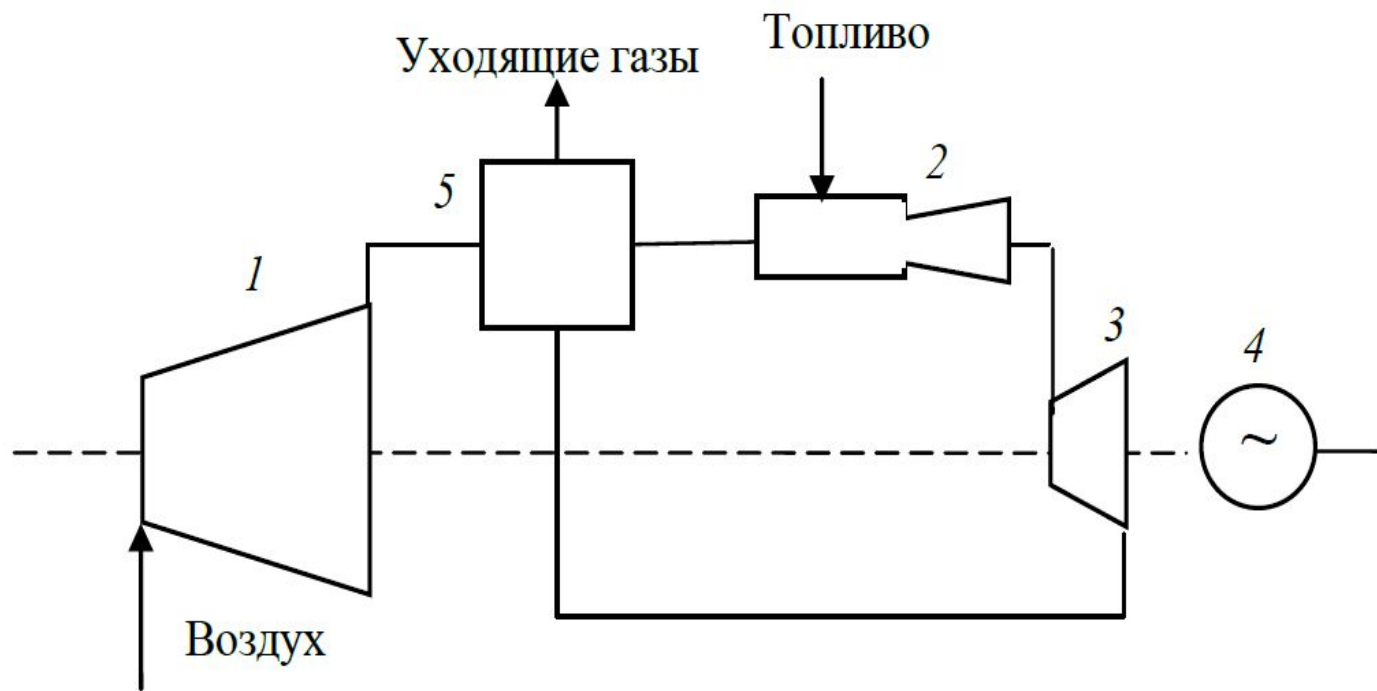
# Сравнение циклов ГТУ

Однако, ГТУ с изохорным подводом теплоты не получили широкого распространения.

## Недостатки

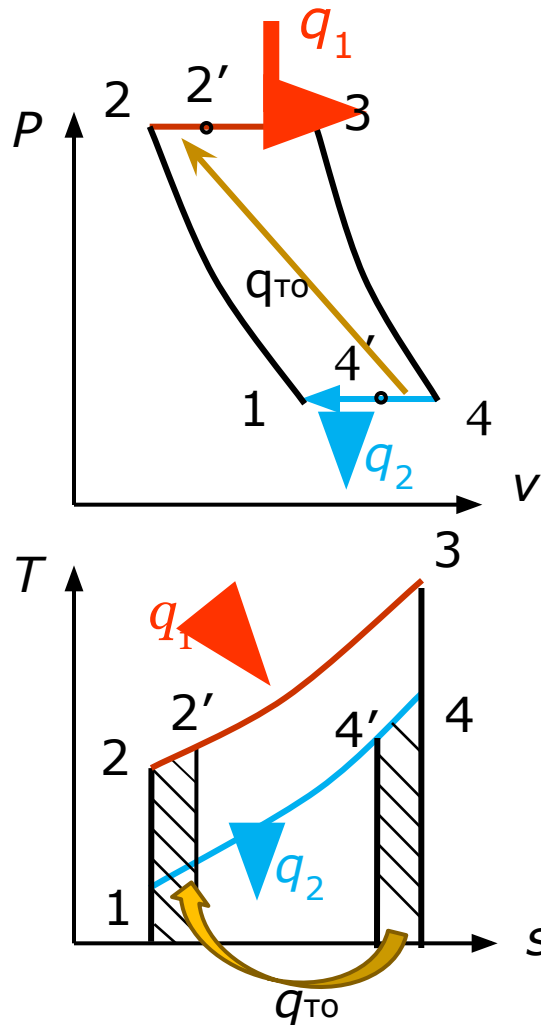
- Сложности в организации изохорного сгорания топлива
- Усложнение конструкции камеры сгорания
- Усиленный износ клапанов

# Цикл ГТУ с регенерацией тепла



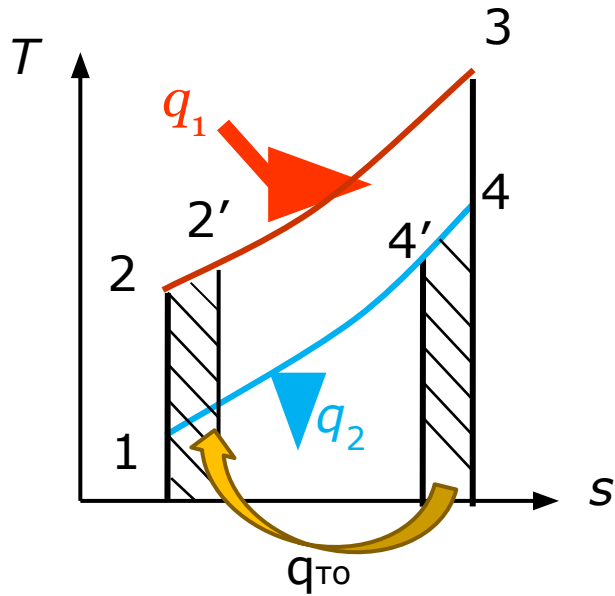
- 1 – воздушный компрессор
- 2 – камера сгорания
- 3 – газовая турбина
- 4 – электрогенератор
- 5 - регенератор

# Цикл ГТУ с регенерацией тепла



- 1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре
- 2-2' нагрев воздуха в регенераторе за счет теплоты уходящих газов
- 2'-3 нагрев рабочего тела в камере сгорания при  $p = \text{const}$  в процессе подвода тепла при сжигании топлива
- 3-4 адиабатное расширение рабочего тела в турбине
- 4-4' – отвод теплоты от уходящих газов в регенераторе
- 4-1 – охлаждение газов в атмосфере

# Характеристики цикла ГТУ с регенерацией тепла



$$\sigma = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

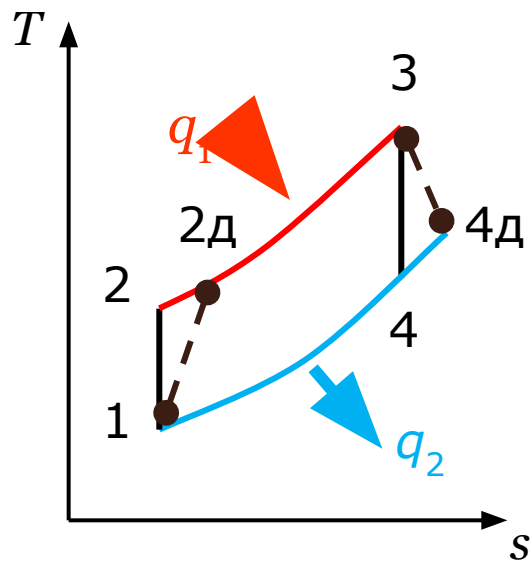
$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_{2'}}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(\rho\gamma - 1) - \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} (\gamma - 1)}{\gamma\beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} (\rho - 1)}$$

$$\gamma = \frac{T_{2'}}{T_2}$$

# Учет необратимости в ГТУ



1-2 адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

1-2д условное необратимое адиабатное сжатие воздуха в компрессоре

2д-3 изобарный подвод теплоты ( $p=\text{const}$ )

3-4 адиабатное расширение рабочего тела в газовой турбине

3-4д условное необратимое адиабатное расширение рабочего тела в турбине

4-1 изобарный отвод теплоты

# Учет необратимости в ГТУ

$$\eta_{\text{к}}^{\text{ад}} = \frac{l_{\text{к}}^{\text{T}}}{l_{\text{к}}^{\text{Д}}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

$$\eta_{0\text{i}}^{\text{T}} = \frac{l_{\text{T}}^{\text{Д}}}{l_{\text{T}}^{\text{T}}} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4}$$

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_{\text{д}}} = \frac{l_{\text{T}}^{\text{Д}} - l_{\text{к}}^{\text{Д}}}{h_3 - h_{2'}}$$

$$l_e = \left( (h_3 - h_4) \eta_{0\text{i}}^{\text{T}} - (h_2 - h_1) / \eta_{\text{к}}^{\text{ад}} \right) \eta_{\text{мех}}$$

$\eta_{\text{мех}}$  - механический КПД

$$\eta_e = \frac{l_e}{q_{\text{д}}}$$

$$N_e = G_{\text{возд}} l_e$$

## **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГТУ**

**применение регенерации  
тепла отходящих газов**

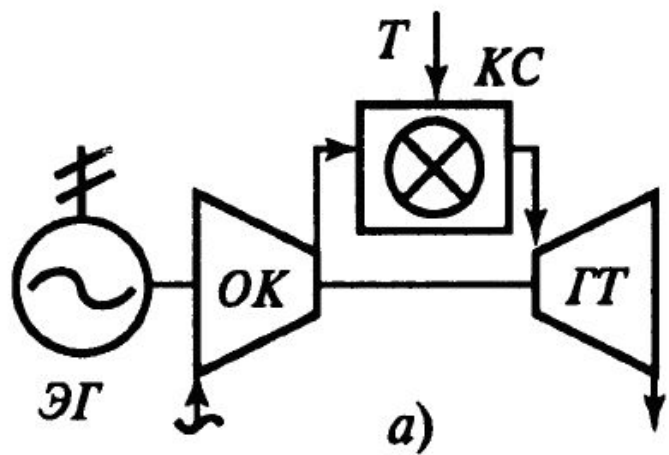
**создание сложных  
многовальных установок**

**ступенчатое сжатие  
воздуха с промежуточным  
его охлаждением**

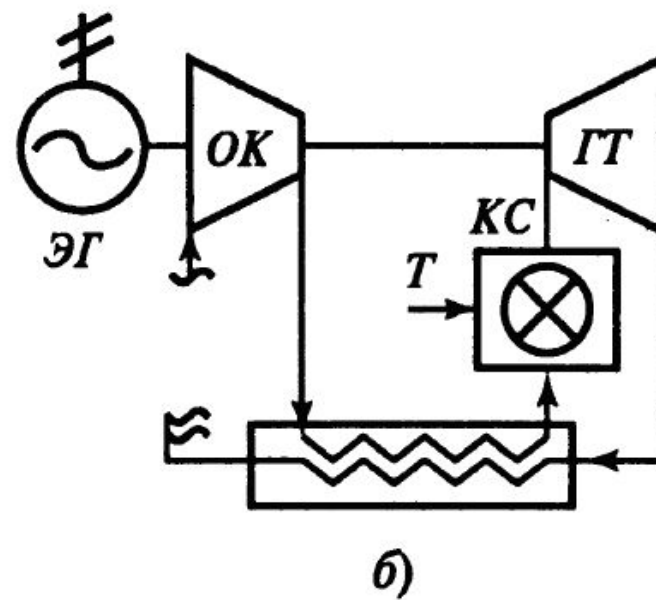
**применение ступенчатого  
расширения с промежуточным  
подогревом рабочего газа**

**создание комбинированных установок, работающих по  
парогазовому циклу с поршневыми камерами сгорания**

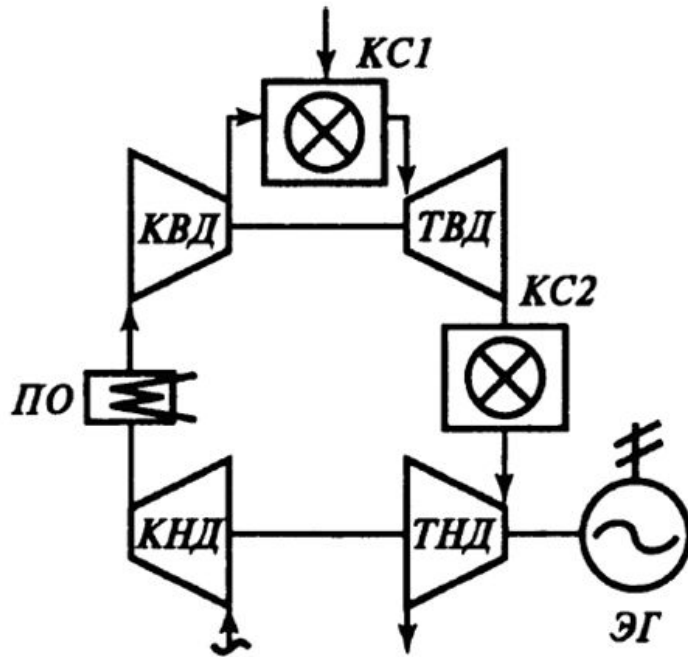




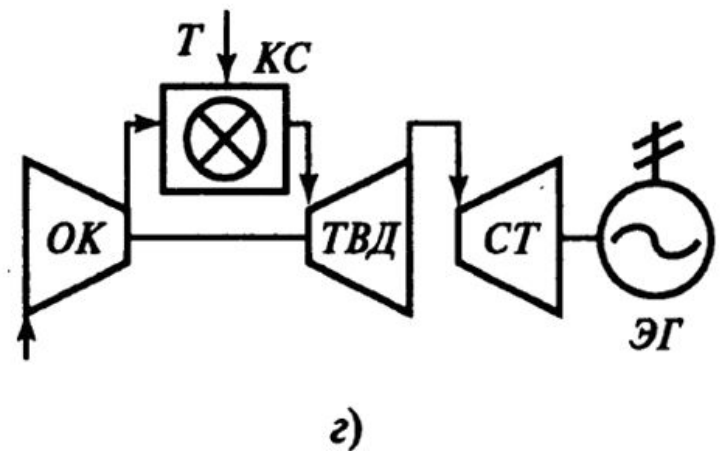
а – одновальная ГТУ



б – одновальная ГТУ с регенерацией



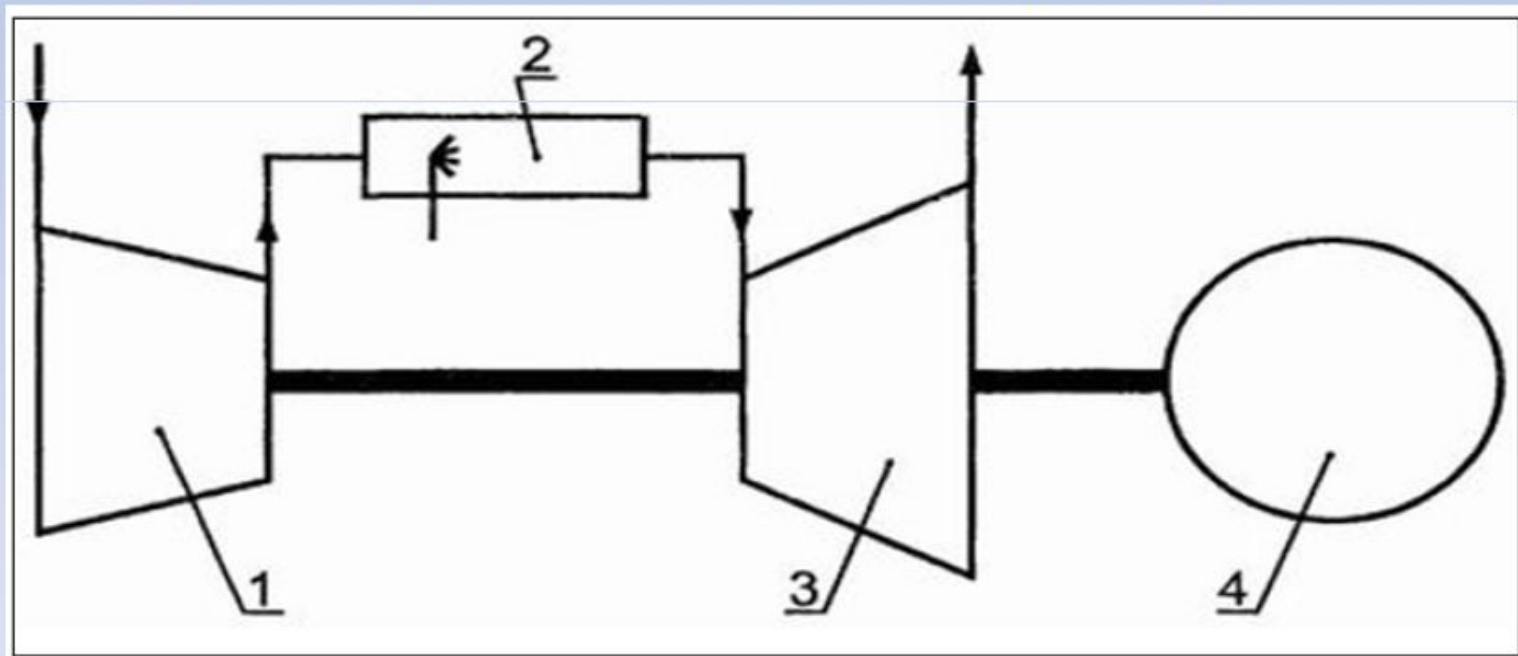
в – двухвальная ГТУ с промежуточным охлаждением (ПО) циклового воздуха и промежуточным перегревом газов (ПП) при их расширении. Возможны схемы с регенерацией и без нее



г – двухвальная ГТУ с силовой турбиной

**Одновальный ГТД** - простейший газотурбинный двигатель имеет только одну турбину, которая приводит компрессор и одновременно является источником полезной мощности.

Это накладывает ограничение на режимы работы двигателя



1 - компрессор; 2 - камера сгорания; 3 - турбина; 4 - нагрузка

# ГТД с регенерацией

– ГТД, термодинамический цикл которого отличается наличием регенеративного охлаждения рабочего тела на выходе из газовой турбины и соответственно регенеративного подогрева воздуха за компрессором

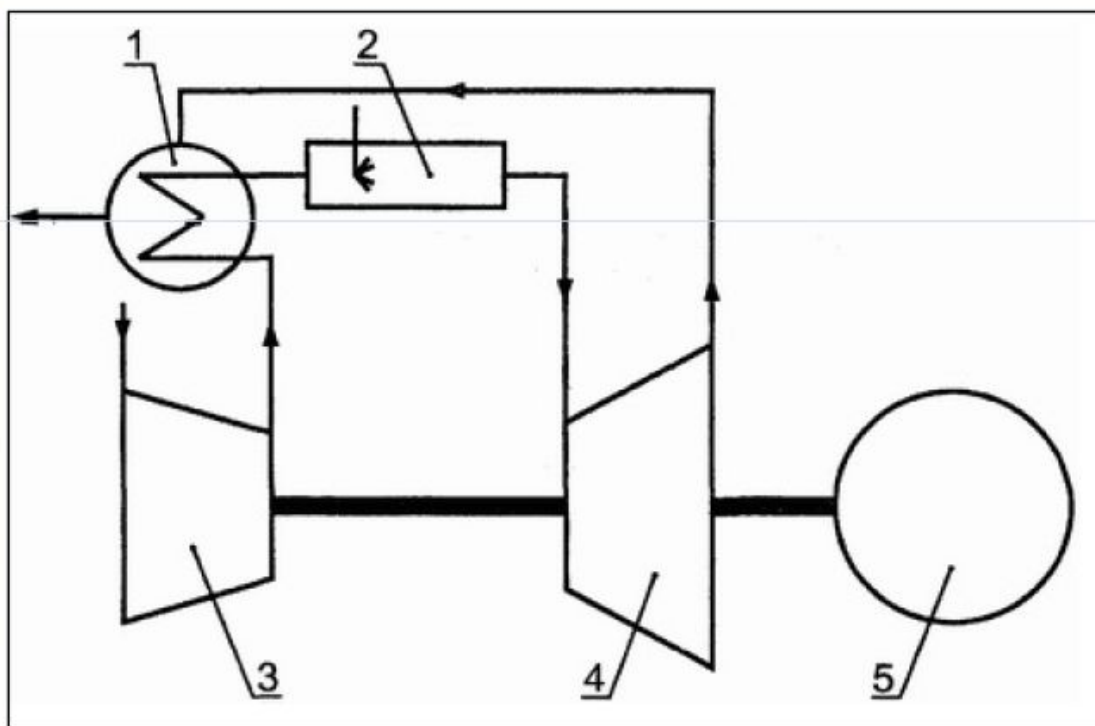


Схема ГТУ с одновальным ГТД  
регенеративного цикла

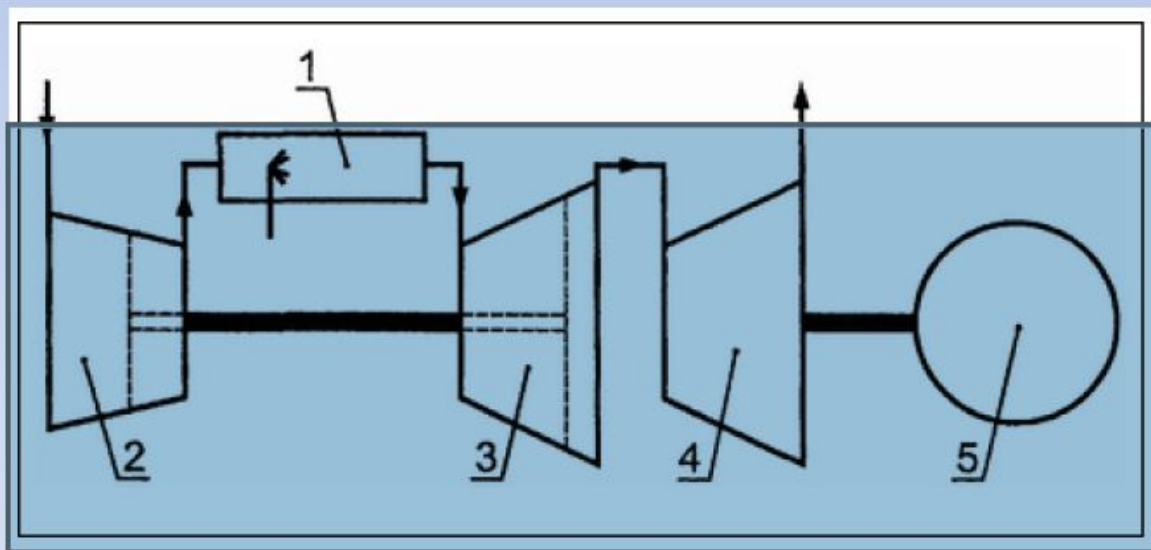
Снижение расхода топлива за счёт сокращения потерь теплоты с уходящими газами

- 1 – теплообменный аппарат;
- 2 - камера сгорания;
- 3 - компрессор;
- 4 – турбина;
- 5 - нагрузка



**Многовальный газотурбинный двигатель** - двигатель, имеющий, по крайней мере, две газовые турбины, вращающиеся на независимых валах

Деление турбины на две и более ступеней с их независимым друг от друга числом оборотов, что позволяет ре-гулировать мощность ГТУ при частичных нагрузках, не снижая эффективности изменением расхода и топлива, и воздуха

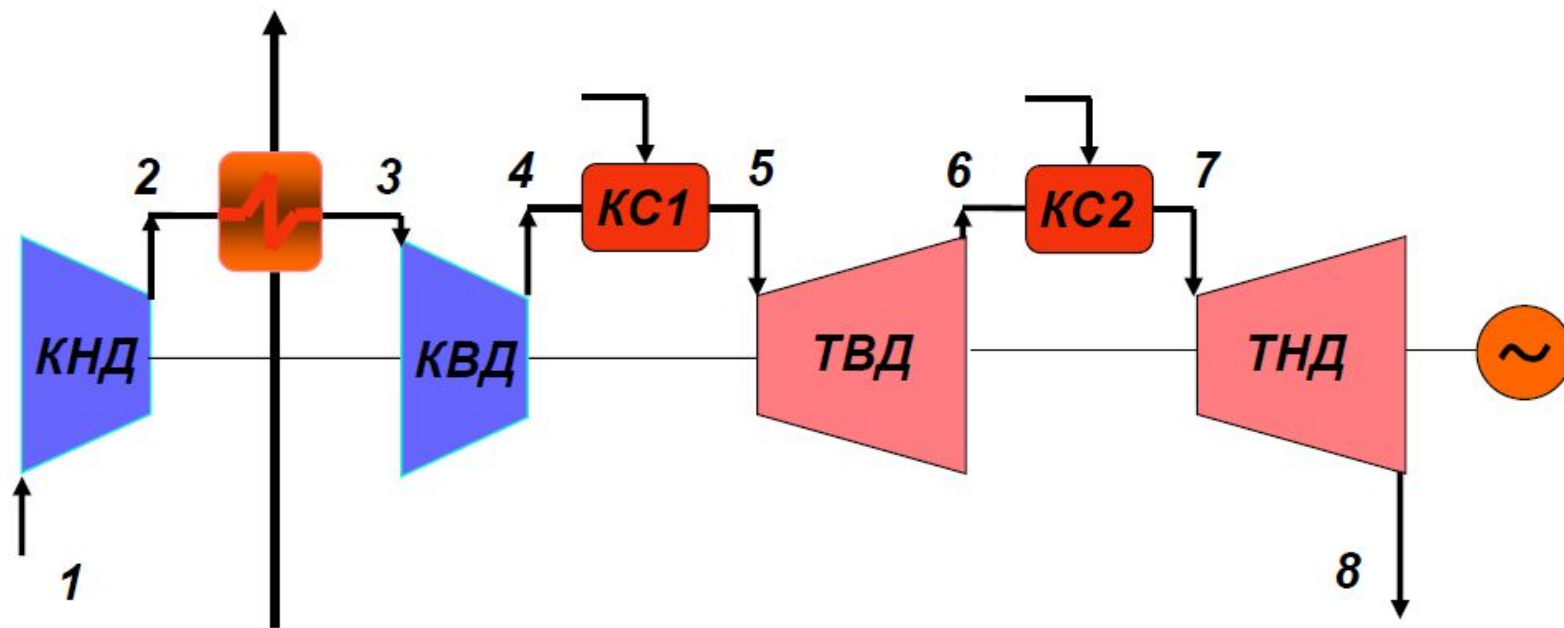


- 1 - камера сгорания;
- 2 - компрессор;
- 3 - турбина;
- 4 - силовая турбина;
- 5 - нагрузка

Схема ГТУ с многовальным ГТД простого цикла со свободной силовой турбиной

Пунктиром показана альтернативная двухкаскадная компоновка ГТД

# Схема ГТУ с многоступенчатым сжатием и расширением

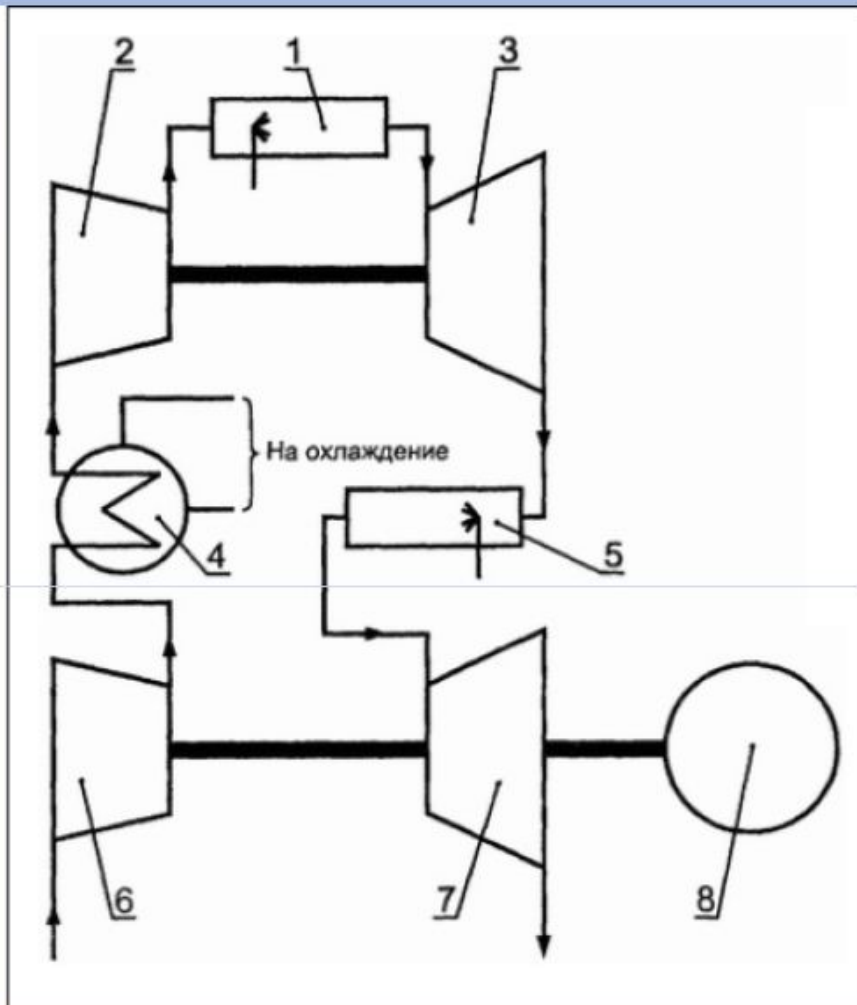


# Цикл ГТУ с многоступенчатым сжатием и расширением



**ГТД с циклом промежуточного охлаждения (подогрева) - двигатель, термодинамический цикл которого включает охлаждение рабочего тела в процессе его сжатия (подогрев рабочего тела в процессе его расширения)**

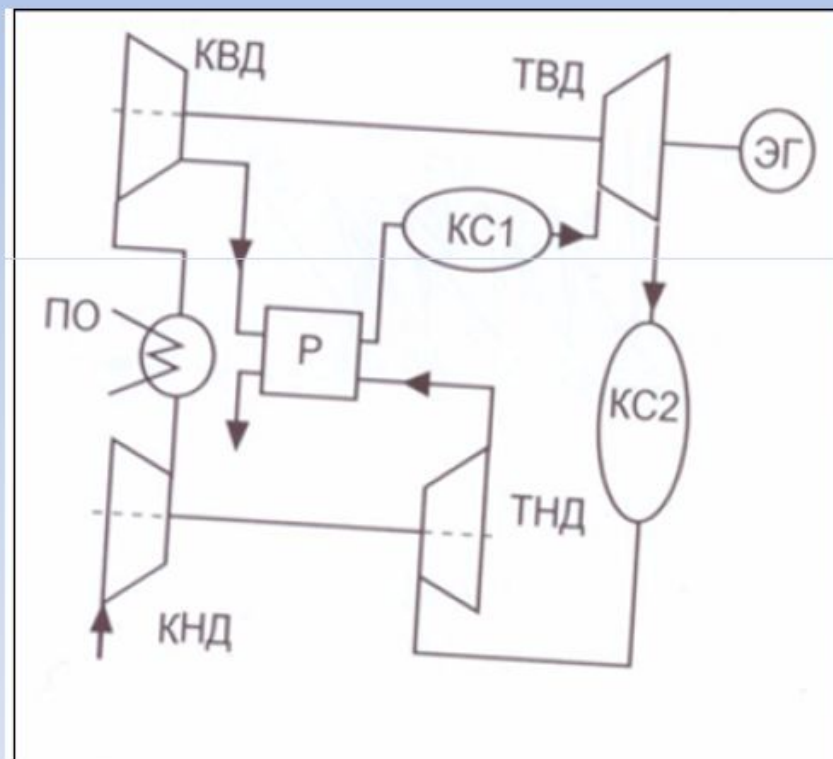
Уменьшение затрачиваемой работы на сжатие воздуха в компрессоре и увеличение работы, получаемой при расширении рабочего газа в турбине



*Схема ГТУ с многовальным ГТД сложного цикла (с промежуточным охлаждением и промежуточным подогревом)*



## Двухвальная блокированная регенеративная ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха и промежуточным подогревом газа перед турбиной высокого давления



**КПД - 44-48%**

КНД- компрессор низкого давления  
ПО- промежуточный воздухоохладитель  
КВД- компрессор высокого давления  
Р- регенератор  
КС1 – основная камера сгорания  
ТВД- турбина высокого давления  
ЭГ- электрогенератор  
КС2–камера промежуточного подогрева  
ТНД – турбина низкого давления