



# Лекция 3

## Газотурбинные установки



## **Рассматриваемые вопросы**

- 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК.**
- 2. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ГТУ ОТКРЫТОГО ТИПА.**
- 3. ОБРАТИМЫЙ ЦИКЛА ГТУ С ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ К РАБОЧЕМУ ТЕЛУ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ.**
- 4. НЕОБРАТИМЫЙ ЦИКЛ С ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ К РАБОЧЕМУ ТЕЛУ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ.**

### 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

1. Газотурбинные установки (ГТУ) могут работать со сгоранием топлива **при постоянном давлении** (рис. 1.1) и **при постоянном объеме** (рис. 1.2). Соответствующие им идеальные циклы делятся на циклы с подводом теплоты в процессе при постоянном давлении и постоянном объеме.

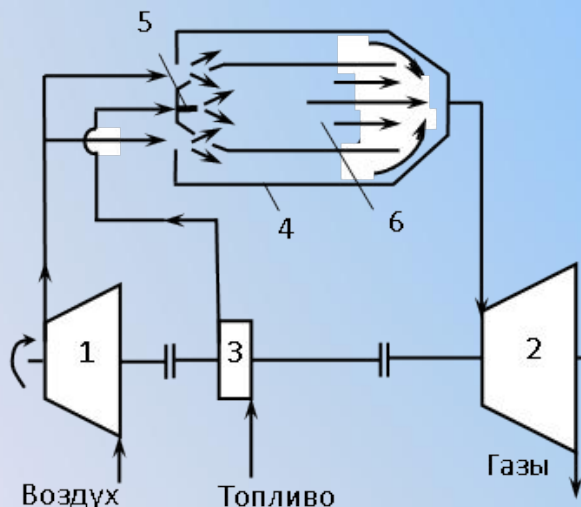


Рис. 1.1. Схема ГТУ со сгоранием топлива при постоянном давлении:

- 1 – турбокомпрессор; 2 – газовая турбина;  $\theta = f(Q)$
- 3 – топливный насос; 4 – камера сгорания;  $t = f(Q)$
- 5 – топливная форсунка; 6 – активная

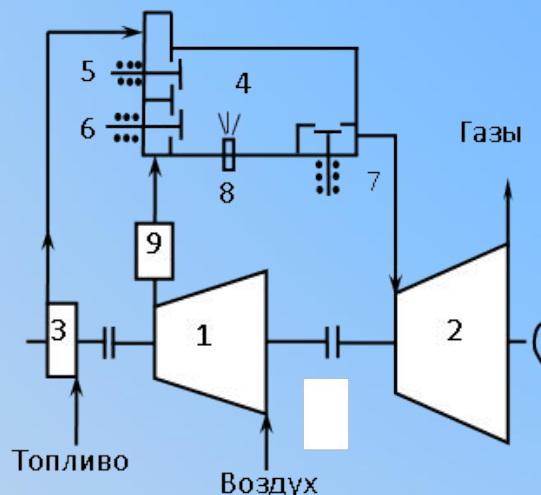


Рис. 1.2. Схема ГТУ со сгоранием топлива при постоянном объеме:

- 5, 6, 7 – соответственно топливный, воздушный и газовый клапаны;
- 8 – запальное устройство;
- 9 – ресивер; остальные обозначения



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

В ГТУ со сгоранием топлива при постоянном давлении процесс горения осуществляется непрерывно, а в ГТУ со сгоранием топлива при постоянном объеме процесс горения является периодическим (пульсирующим).

Сжатый в компрессоре 1 воздух (см. рис. 1.2) подается в ресивер 9 (сосуд большой емкости для выравнивания давления), откуда через воздушный клапан 6 поступает в камеру сгорания 4. Сюда же топливным насосом 3 через топливный клапан 5 подается топливо. Процесс горения производится при закрытых топливном, воздушном и газовом клапанах 5, 6, 7. Воспламенение топливовоздушной смеси осуществляется устройством 8 (электрической искрой). После сгорания топлива в результате повышения давления в камере 4 открывается газовый клапан 7. Продукты сгорания, проходя через сопловые аппараты (на рис. 1.2 не показаны), поступают на рабочие лопатки и приводят во вращение ротор газовой турбины 2.

ГТУ со сгоранием топлива при постоянном объеме практического распространения не получили. Наибольшее распространение получили ГТУ со сгоранием топлива при постоянном давлении.

Далее рассматривается классификация ГТУ со сгоранием топлива при постоянном давлении.



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

2. По назначению ГТУ различаются на **стационарные** и **транспортные**.

Стационарные ГТУ устанавливаются на объектах стационарной энергетики, транспортные на объектах воздушного (авиационные ГТУ), водного (судовые ГТУ) и наземного транспорта.

3. По способу организации рабочего процесса различают ГТУ **открытого** цикла и **замкнутого** цикла.

В ГТУ открытого цикла всасывающие и выхлопные патрубки ГТД сообщаются с атмосферой.

В ГТУ замкнутого цикла рабочее тело не сообщается с атмосферой,

В замкнутой ГТУ (ЗГТУ) вместо камеры сгорания устанавливается нагреватель 1, в котором рабочее тело (газ или воздух) нагревается за счет теплоты, выделяющейся при сжигании топлива (рис. 1.5) [11]. Из нагревателя 1 газ с параметрами  $T_1$ ,  $p_1$  поступает в турбину 3, где, совершая работу, расширяется до давления  $p_2$ , температура его при этом падает до  $T_2$ . Отработавший в турбине 3 газ после регенератора 8 не удаляется в атмосферу, как в ГТУ открытого типа, а направляется в охладитель 4, который выполняет роль теплообменника. В охладителе газ охлаждается до начальной температуры  $T_4$ . Охлажденный газ поступает в компрессор 5, где он сжимается от давления  $p_4$  до  $p_5$ , температура его повышается с  $T_4$  до  $T_5$ . После компрессора 5 газ направляется в регенератор 8, в котором подогревается до температуры  $T_6$ ; давление его снижается от  $p_5$  до  $p_6$  вследствие гидравлических потерь.

### ГТУ открытого цикла

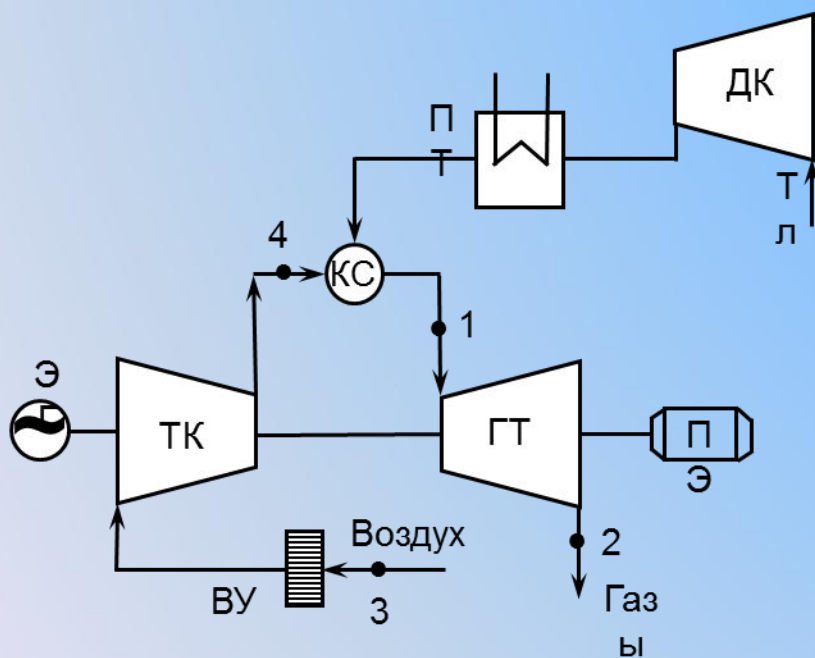


Рис. 1.3. Принципиальная

тепловая схема ГТУ  
открытого типа:

- ВУ – воздухоочистительное устройство;
- ТК – турбокомпрессор;
- ЭГ – электрогенератор;
- КС – камера сгорания;
- ГТ – газовая турбина;
- Тл – топливо; ПТ – подогреватель топлива; ДК – дожимной компрессор; ПЭ – пусковой электродвигатель

### ГТУ замкнутого цикла

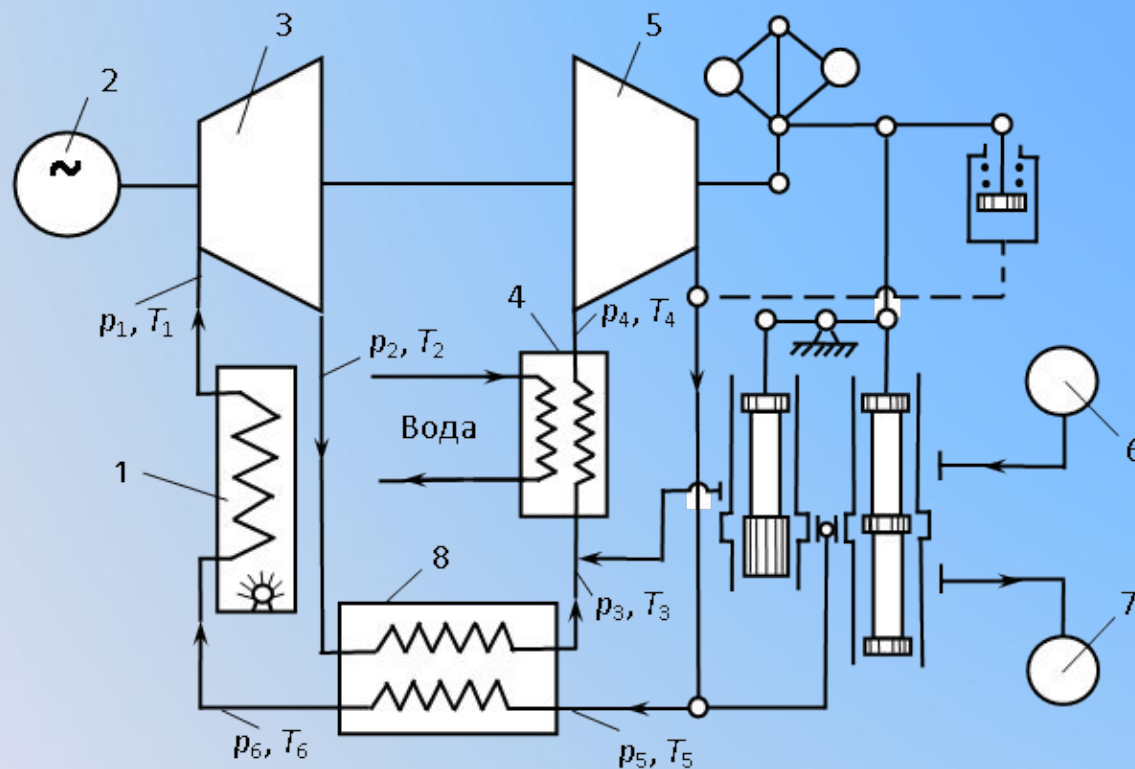


Рис. 1.5. Принципиальная схема замкнутой ГТУ:

- 1 – нагреватель; 2 – электрогенератор; 3 – газовая турбина; 4 – охладитель;
- 5 – турбокомпрессор; 6, 7 – аккумулятор высокого и низкого давления; 8 – регенератор



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

4. По используемому термодинамическому циклу различают:

- ГТУ простого открытого цикла (без промежуточного охлаждения воздуха и регенеративного подогрева воздуха);

- ГТУ сложного цикла.

В свою очередь ГТУ сложного цикла подразделяются на:

- ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха;

- ГТУ с регенеративным подогревом воздуха;

- ГТУ с промежуточным охлаждением и регенеративным подогревом воздуха;

- ГТУ с промежуточным подогревом газов.

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;

- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;

- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)

- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;

- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;

- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)





Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Характерной отличительной особенностью высокотемпературных ГТУ является наличие отбора части воздуха (до 15% от общего расхода) из промежуточных ступеней компрессора для охлаждения высокотемпературных элементов турбины (сопл и рабочих лопаток первых ступеней, дисков газовой турбины).

6. По конструктивному исполнению ГТУ:

- одновальные (блокированные);
- многовальные (со свободной силовой турбиной);
- однокомпрессорные;
- 2-х компрессорные;

По конструктивному исполнению камер сгорания:

- с выносными камерами (камерой) сгорания;
- с кольцевыми камерами сгорания;
- с трубчато-кольцевыми камерами сгорания;

7. По значению агрегатной мощности разделяют на:

- ГТУ малой мощности  $N_e \leq 25$  МВт;
- ГТУ средней мощности  $25 < N_e \leq 70$  МВт;
- ГТУ большой мощности  $N_e > 70$  МВт (до 350 МВт).



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

## 2. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ГТУ ОТКРЫТОГО ТИПА

### Принципиальная тепловая схема ГТУ простого открытого типа

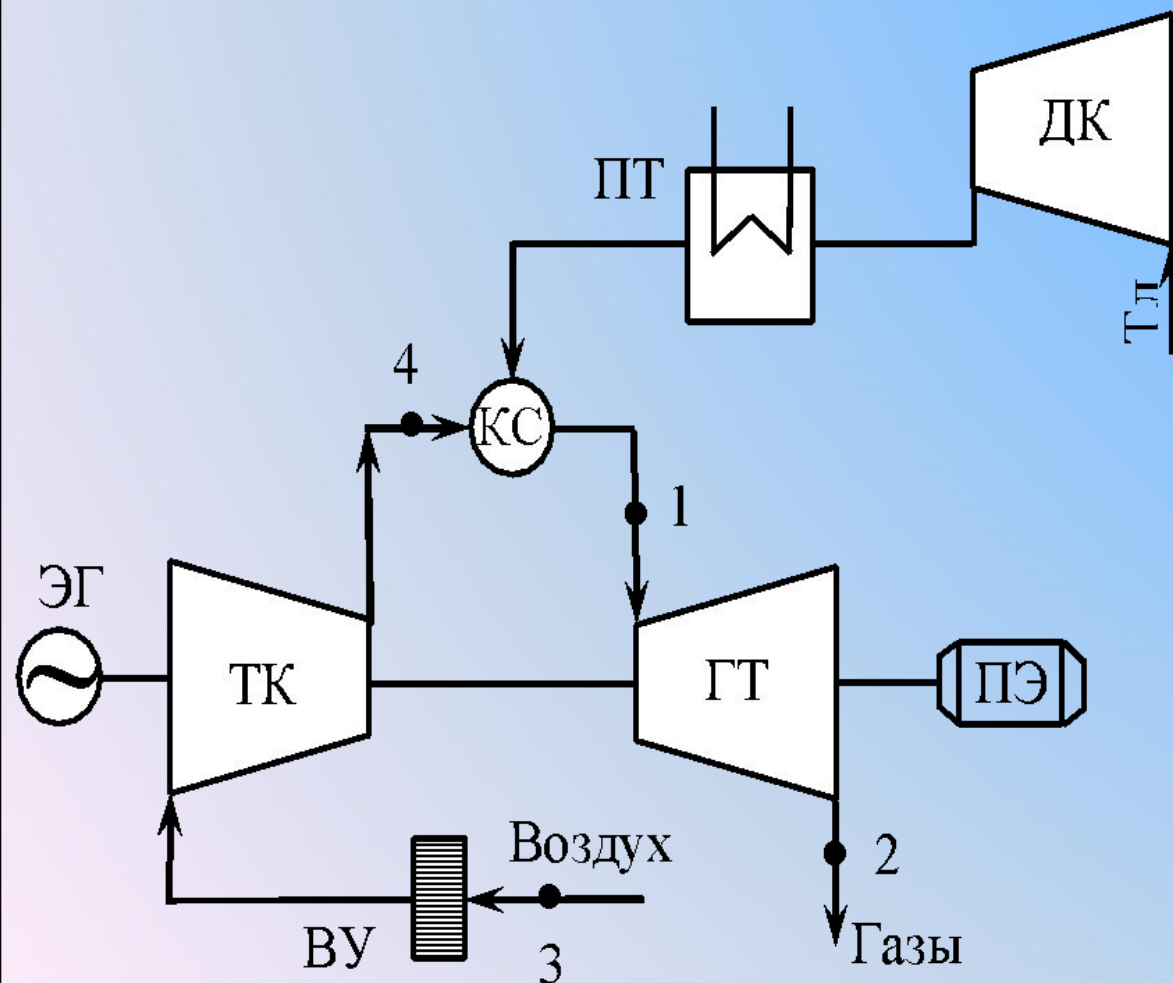


Рис. 1.3. Принципиальная тепловая схема ГТУ открытого типа:

ВУ – воздухоочистительное устройство;

ТК – турбокомпрессор;

ЭГ – электрогенератор;

КС – камера сгорания;

ГТ – газовая турбина;

Тл – топливо; ПТ –

подогреватель топлива; ДК –

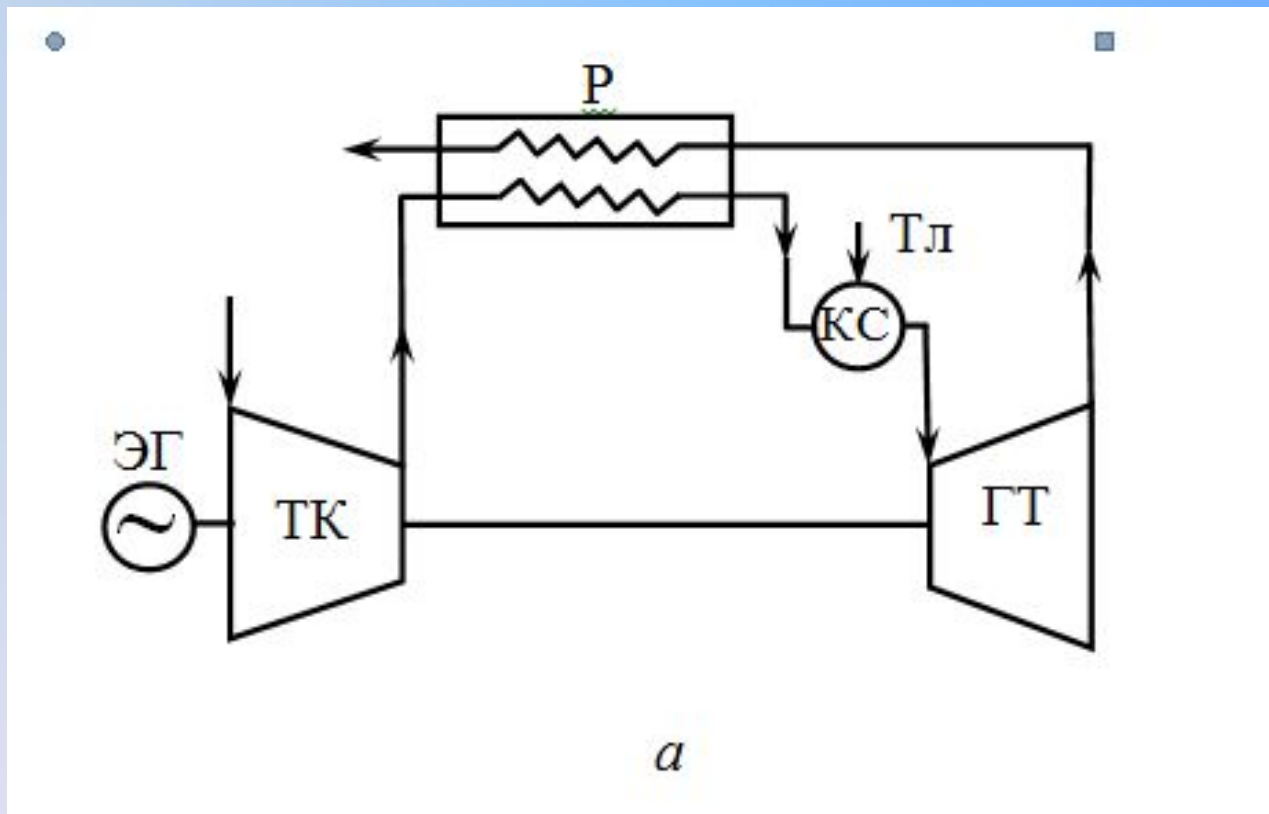
дожимной компрессор; ПЭ –

пусковой

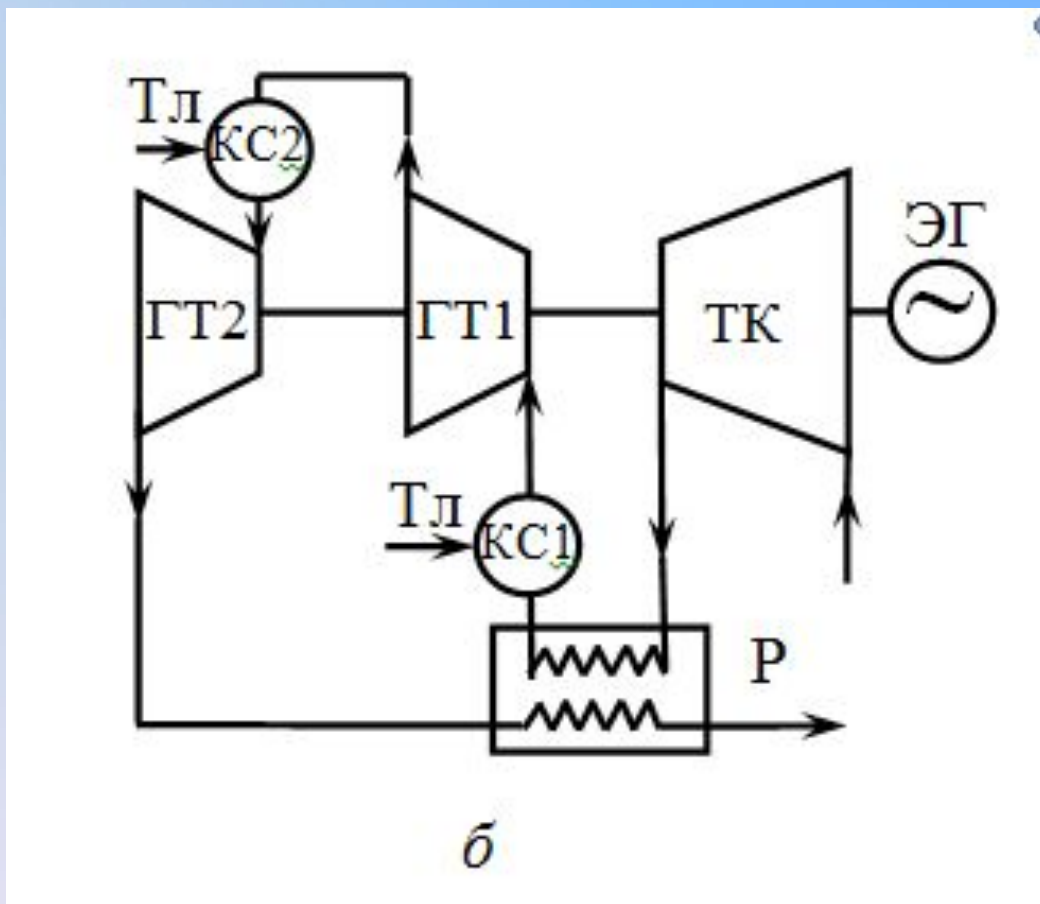


Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

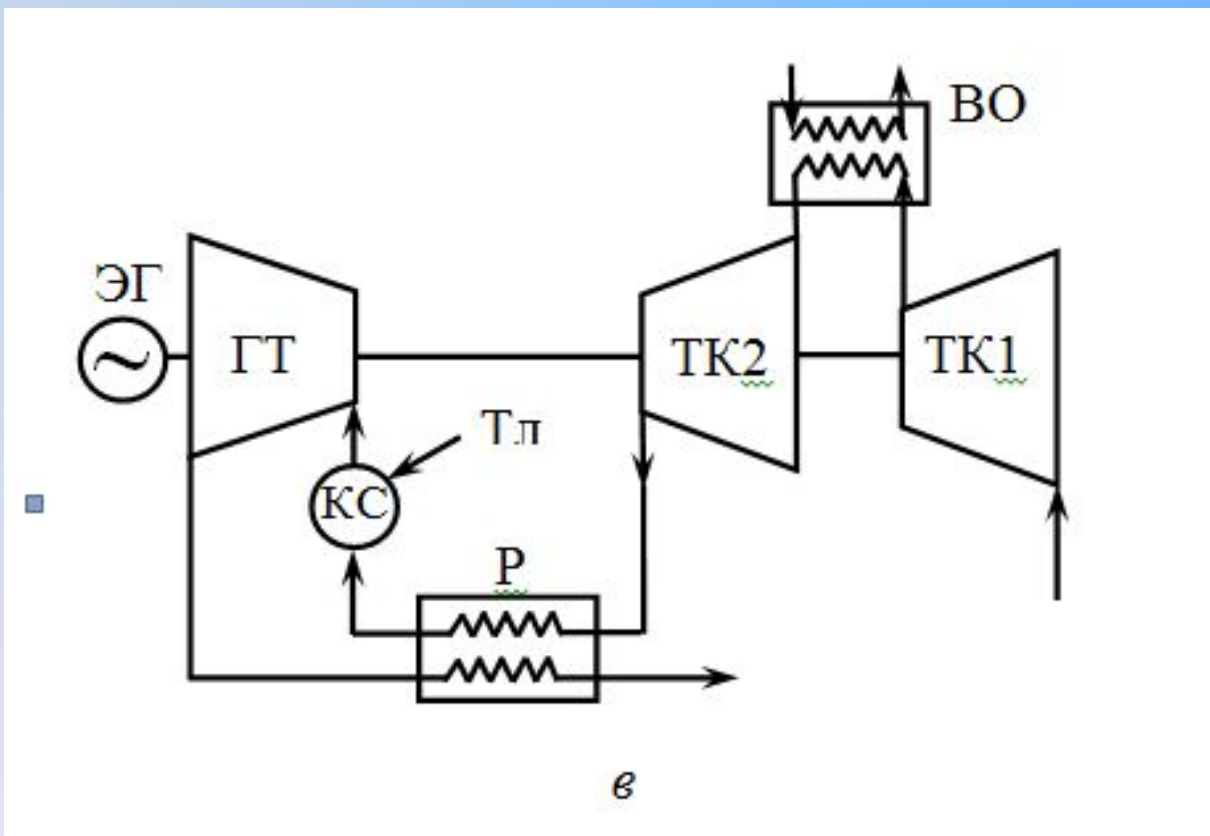
Принципиальная тепловая схема ГТУ регенеративным подогревом воздуха



Принципиальная тепловая схема ГТУ регенеративным подогревом воздуха и промежуточным подогревом газов



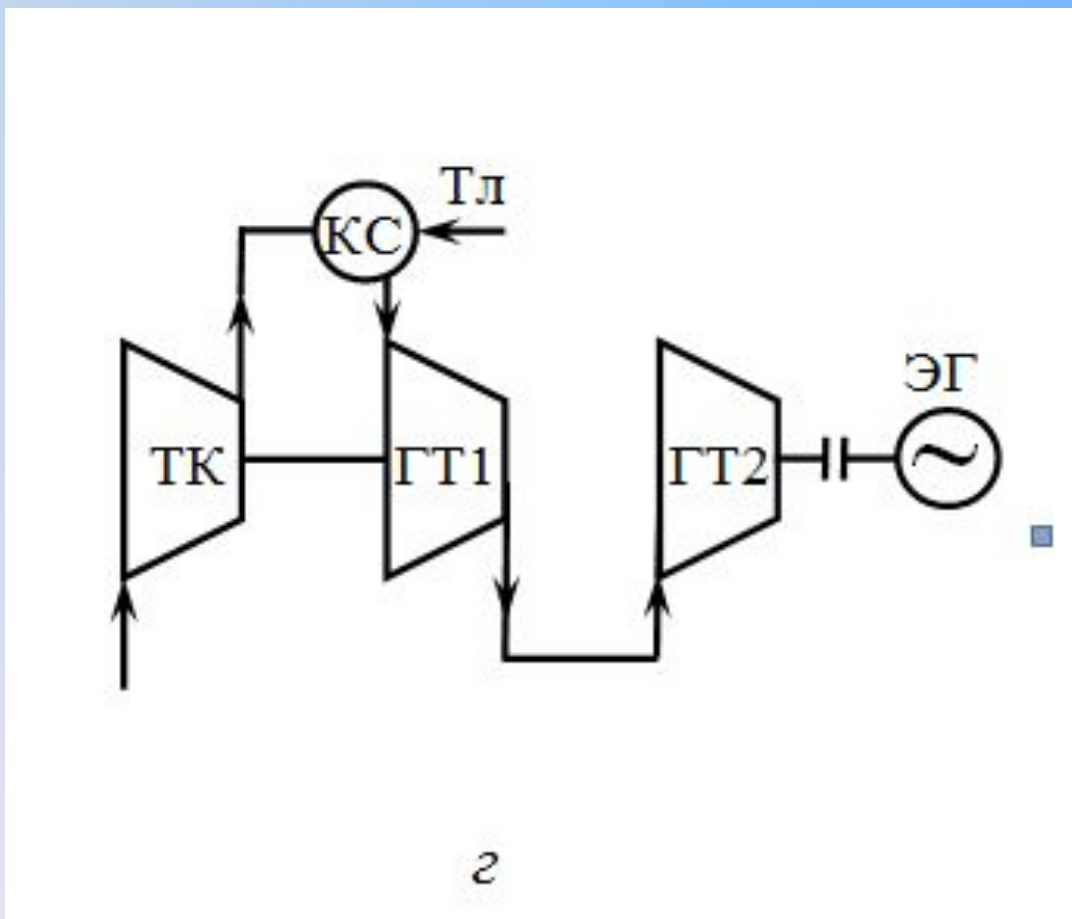
Принципиальная схема ГТУ с промежуточным охлаждением и регенеративным подогревом воздуха





Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

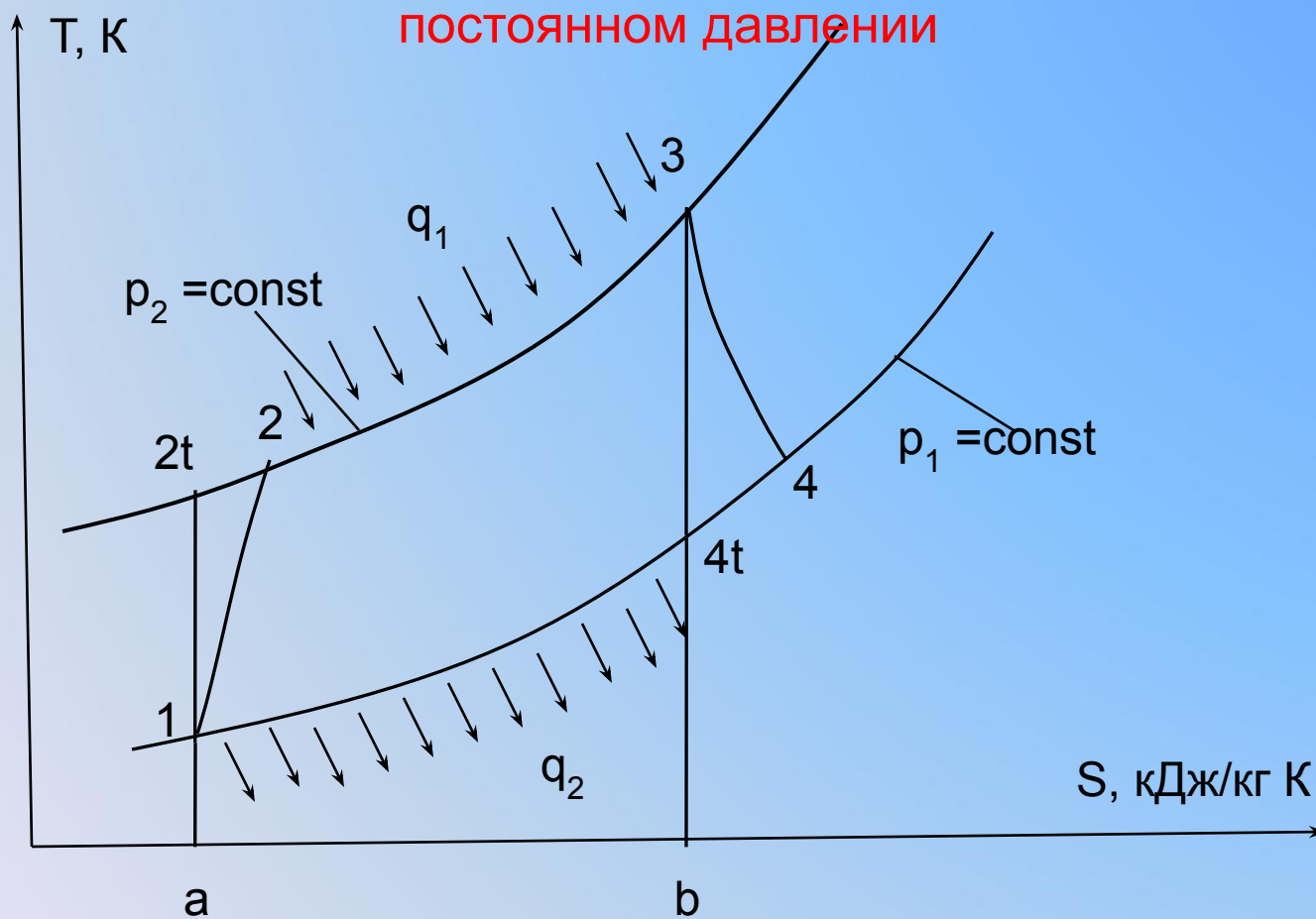
Принципиальная схема ГТУ простого открытого типа со свободной силовой турбиной





Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

### 3. Обратимый цикл ГТУ с подводом теплоты к рабочему телу при постоянном давлении







## Основные характеристики обратимого цикла ГТУ

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350$  °С, в перспективе до  $1500$  °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

По параметрам рабочего тела различают:  
низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;  
среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;  
высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)  
ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;  
ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;  
ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

В.П.Павловский  
Санкт-Петербургский  
государственный  
технологический  
университет  
растительных полимеров  
Физико-математический  
факультет  
Санкт-Петербург  
190000

$\eta = 0,97 \dots 0,99$  – КПД камеры сгорания, учитывающий полноту сгорания топлива.

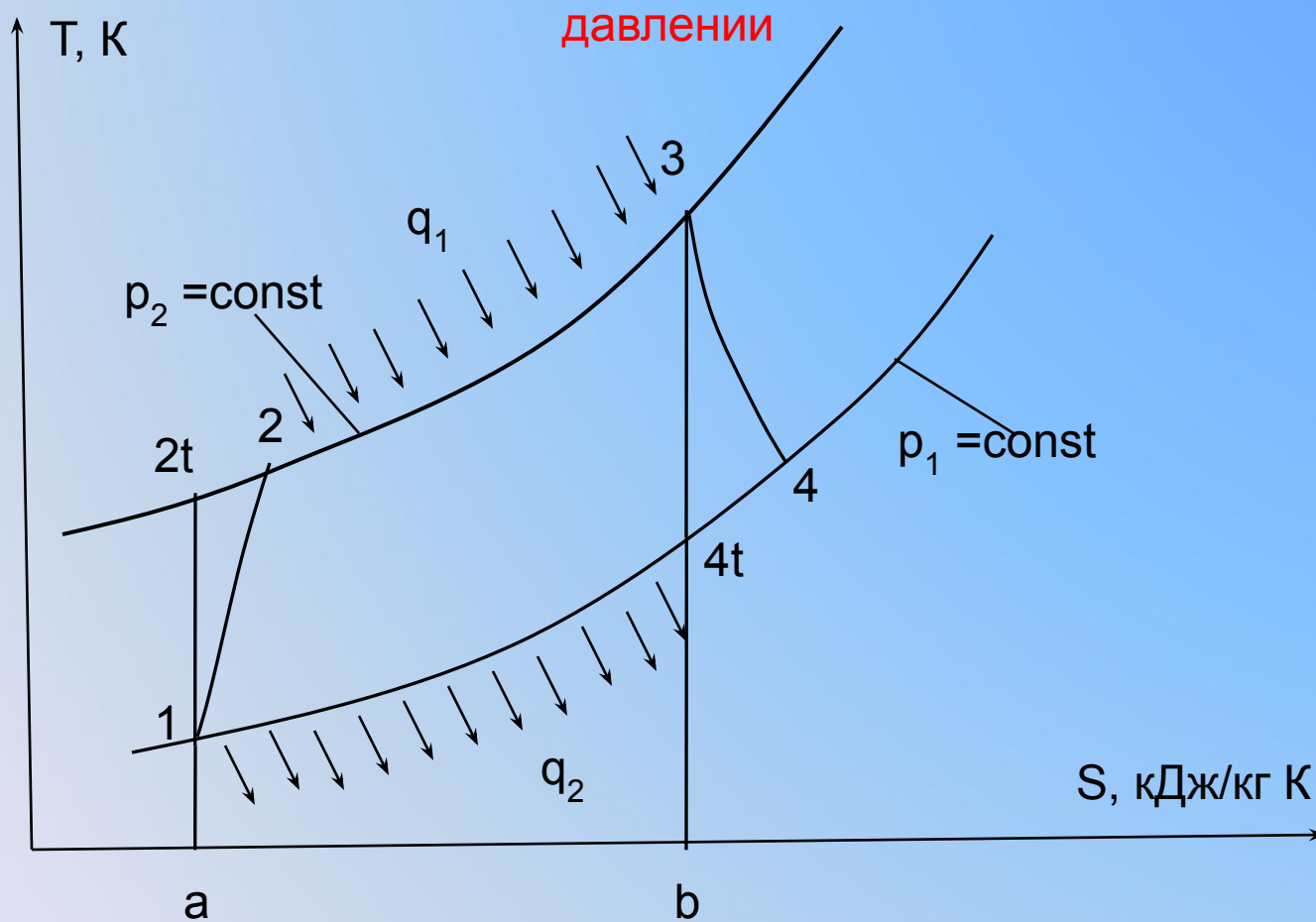
Термический КПД обратимого цикла ГТУ определяется как отношение работы цикла к подведенной теплоте

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\text{к}} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\text{к}} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\text{к}} > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



4. Необратимый цикл ГТУ с подводом теплоты к рабочему телу при постоянном давлении





## Основные характеристики необратимого цикла

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)





## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

Введем обозначение

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

- 5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

- 5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

А также помня, что

- 5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

тогда

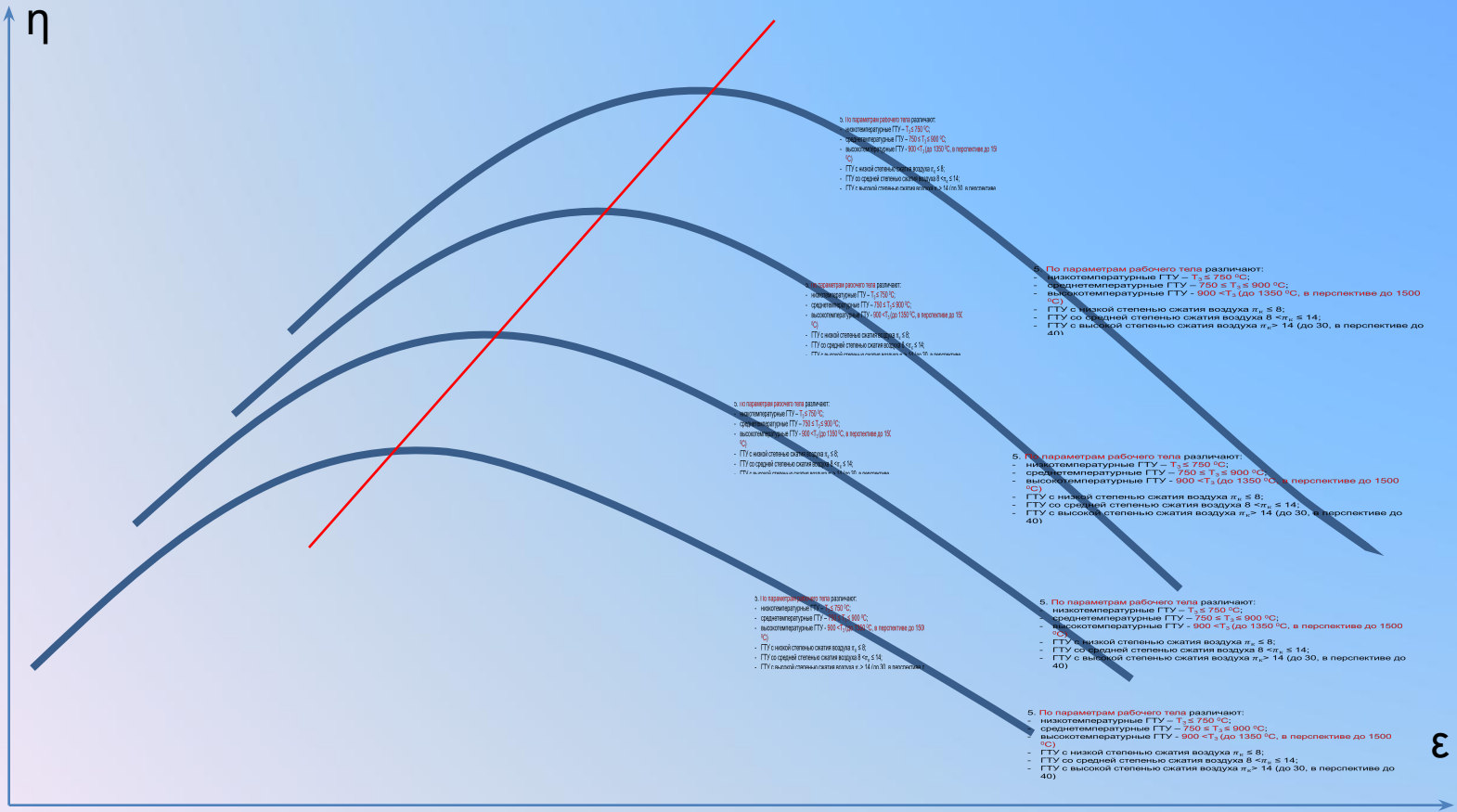
### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

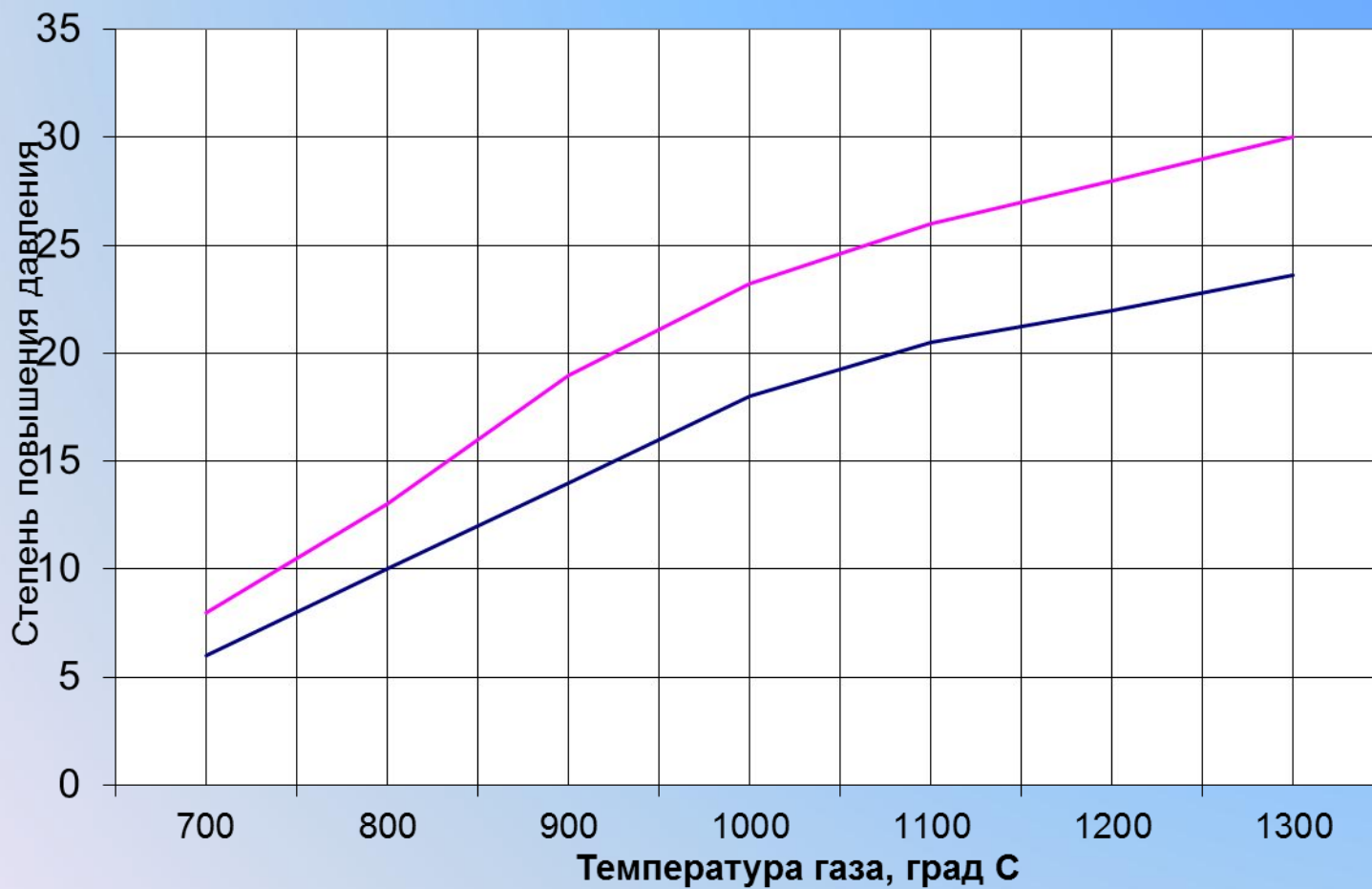
5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ -  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - среднетемпературные ГТУ -  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40).







Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

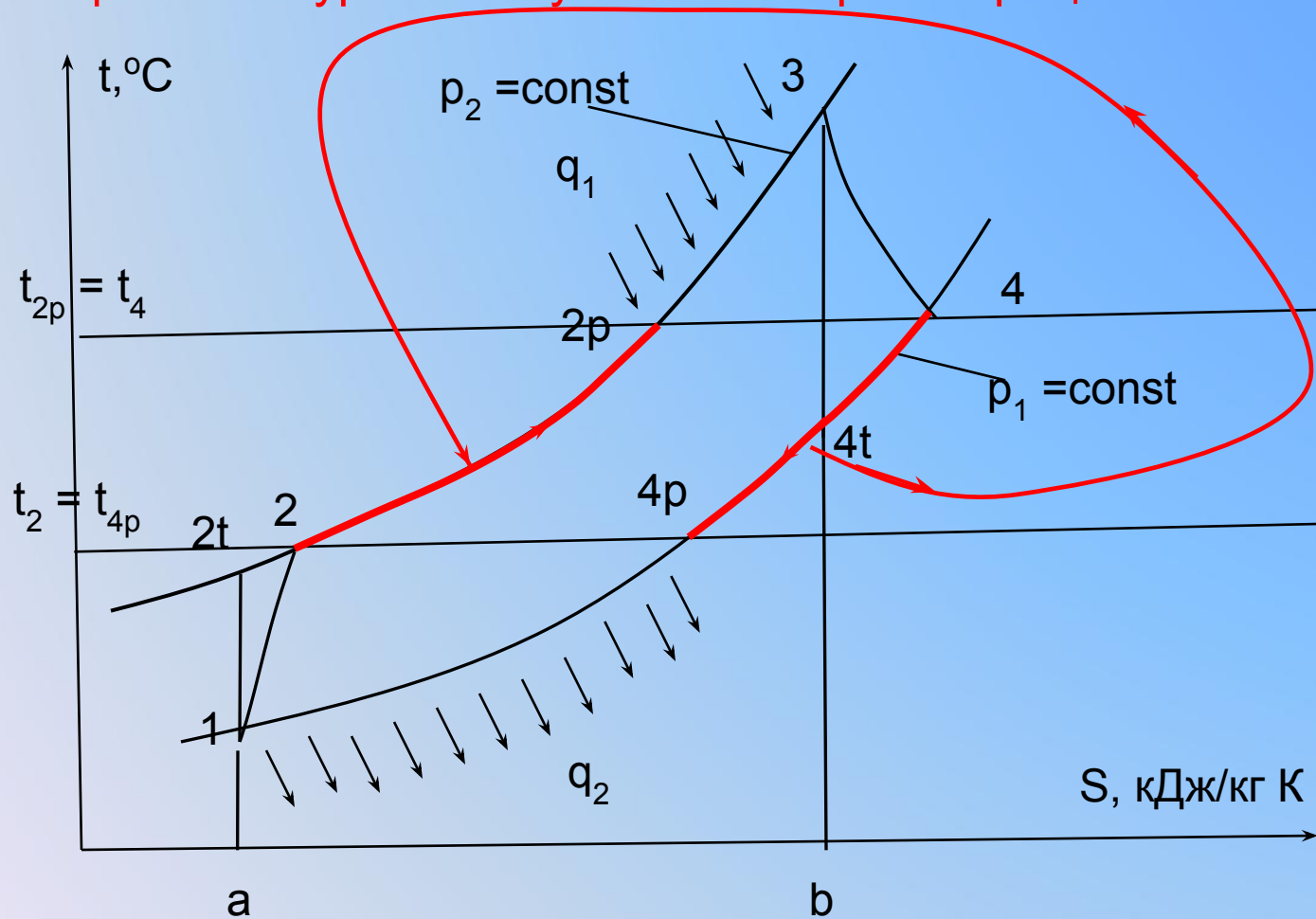


— Действительное значение      — Оптимальное значение



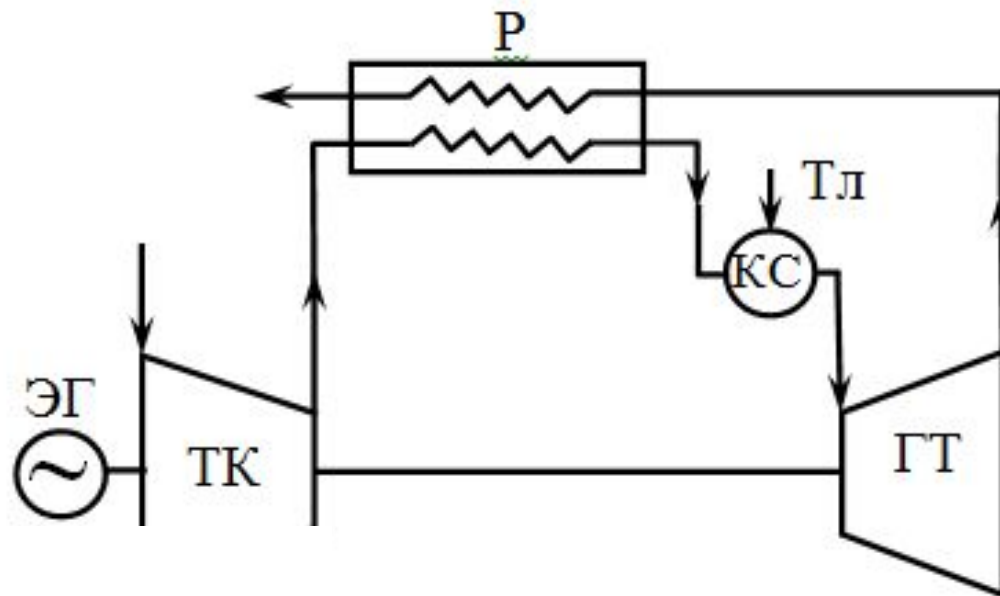
Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

## 5. Цикл газотурбинной установки с регенерацией теплоты





Принципиальная тепловая схема ГТУ регенеративным подогревом воздуха



*a*

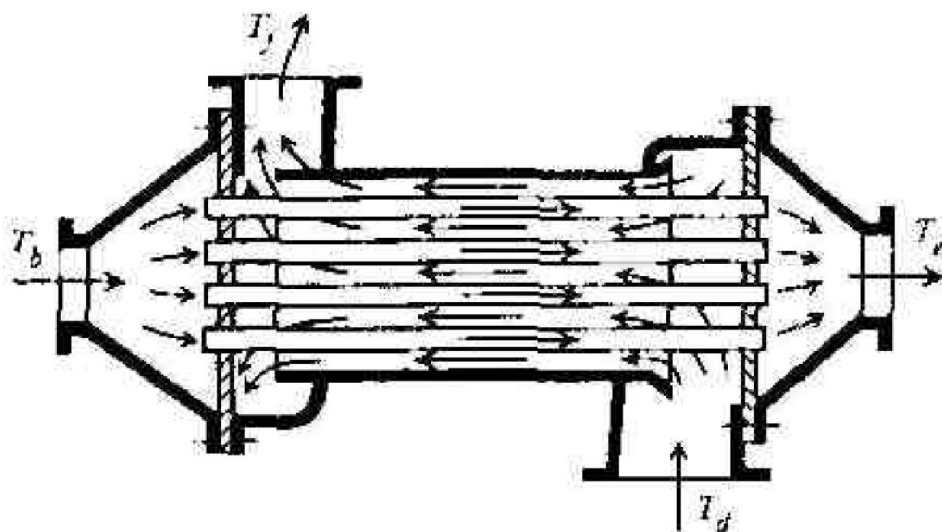


Схема регенератора с противотоком



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ -  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ -  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_c \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_c \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_c > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

- количество теплоты сообщаемое воздуху в регенераторе;

5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ -  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ -  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_c \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_c \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_c > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

- предельно возможное количество теплоты сообщаемое воздуху в регенераторе;

Эффективность регенератора как теплообменника оценивают степень регенерации  $\sigma$ , определяемой отношением количества теплоты, переданного воздуху, к предельно возможному количеству теплоты:

5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ -  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ -  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_c \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_c \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_c > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(1)

Степень регенерации зависит от площади поверхности регенератора. Установим эту зависимость для регенератора с противотоком (см. рис. выше).

Количество теплоты, сообщенное воздуху в единицу времени,

$$Q = k \cdot f (t_4 - t_{4p}), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи в регенераторе;  $f$  — площадь теплопередающей поверхности регенератора.



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

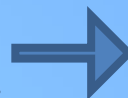
Также можно записать

$$Q = G \cdot c_{pв} \cdot (t_{2p} - t_2) \quad (3)$$

Приравнявая (2) к (3) получим:

$$G \cdot c_{pв} \cdot (t_{2p} - t_2) = k \cdot f \cdot (t_4 - t_{4p})$$

5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

$$(4)$$

Выразив в последней формуле расход G через мощность N и полезную работу H. получим, что площадь поверхности регенератора, отнесенная к мощности, имеет вид

$$N = G \cdot H$$



5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

5. По параметрам рабочего тела различают:
- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
  - среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
  - высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
  - ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
  - ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
  - ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

$$(5)$$

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Из (4) следует также, что уменьшения удельной площади поверхности регенератора можно добиться путем интенсификации теплопередачи (увеличения  $k$ ) и увеличения полезной работы  $H$ . Увеличению  $H$  при заданной мощности соответствует падение расхода  $G$ , а следовательно, и количества теплоты, передаваемого в регенераторе от газа к воздуху

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(6)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(7) тогда

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(8)

Тогда формулу для КПД ГТУ получим с учетом:

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(9)

При отсутствии регенерации  $\sigma=0$  выражение (9) совпадает с предыдущим выражением

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

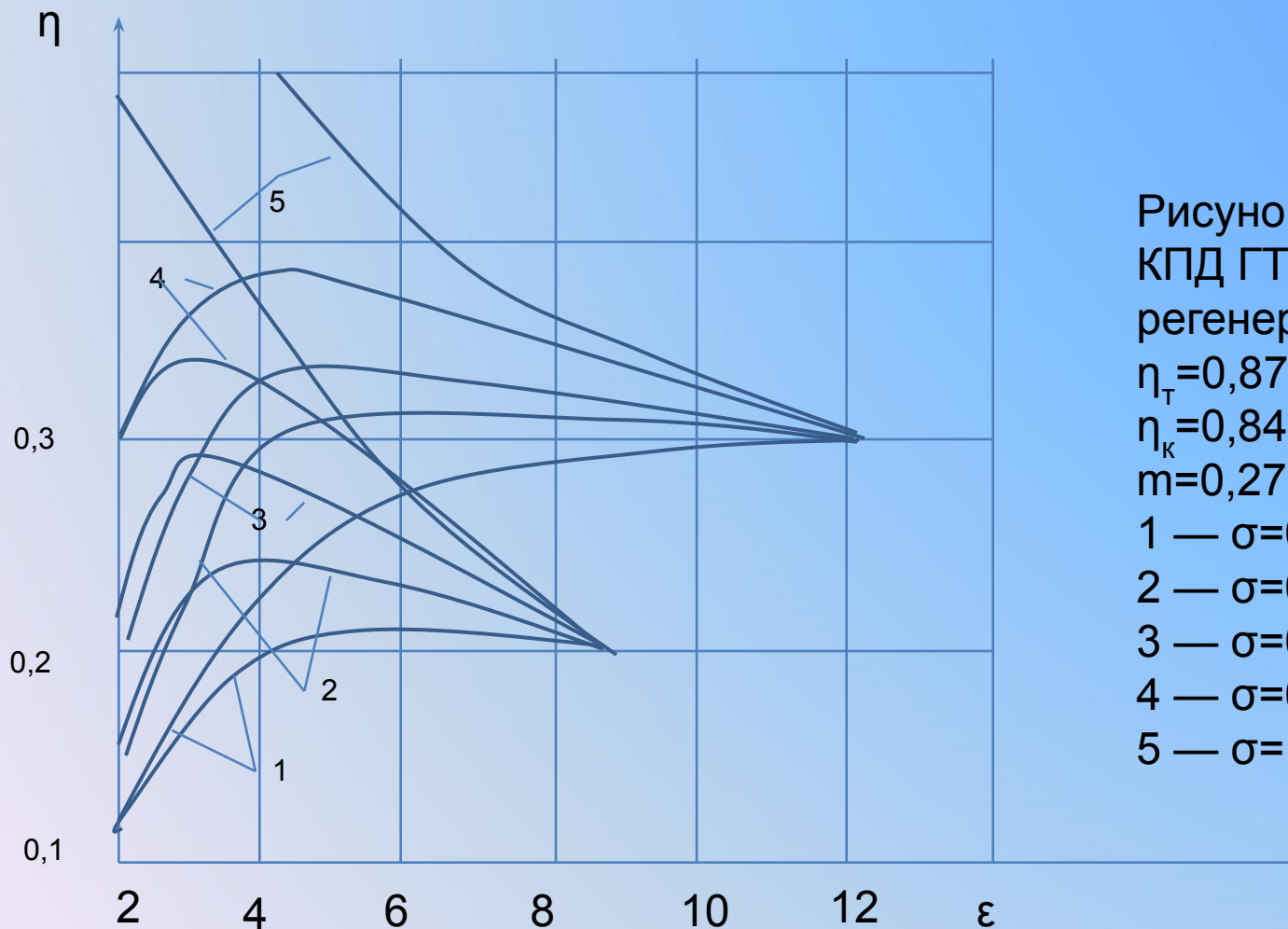


Рисунок 1 -  
КПД ГТУ с  
регенерацией при  
 $\eta_T=0,87$ ;  
 $\eta_K=0,84$ ;  
 $m=0,275$ ;  
1 —  $\sigma=0$ ;  
2 —  $\sigma=0,2$ ;  
3 —  $\sigma=0,5$ ;  
4 —  $\sigma=0,8$ ;  
5 —  $\sigma=1$ ;





Из данных рис. видно, что введение регенерации существенно увеличивает КПД цикла. Оптимальное отношение давления  $\varepsilon$  понижается по мере роста степени регенерации. Это объясняется тем, что с увеличением  $\varepsilon$  при фиксированных значениях температур  $T_1$  и  $T_3$  уменьшается располагаемый температурный перепад  $T_4 - T_2$ , в регенераторе, а следовательно, и эффективность регенерации теплоты.

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

Таблица 1- Влияние степени регенерации на характеристики

Показатель	Значение $\sigma$			
	0	0,5	0,75	1,0
$\varepsilon_\eta$	11	6,17	4,12	1
$\eta, \%$	28,2	32,8	36,1	62
$\frac{\eta - \eta_{\sigma=0}}{\eta}, \%$	0	14,0	21,9	54,5



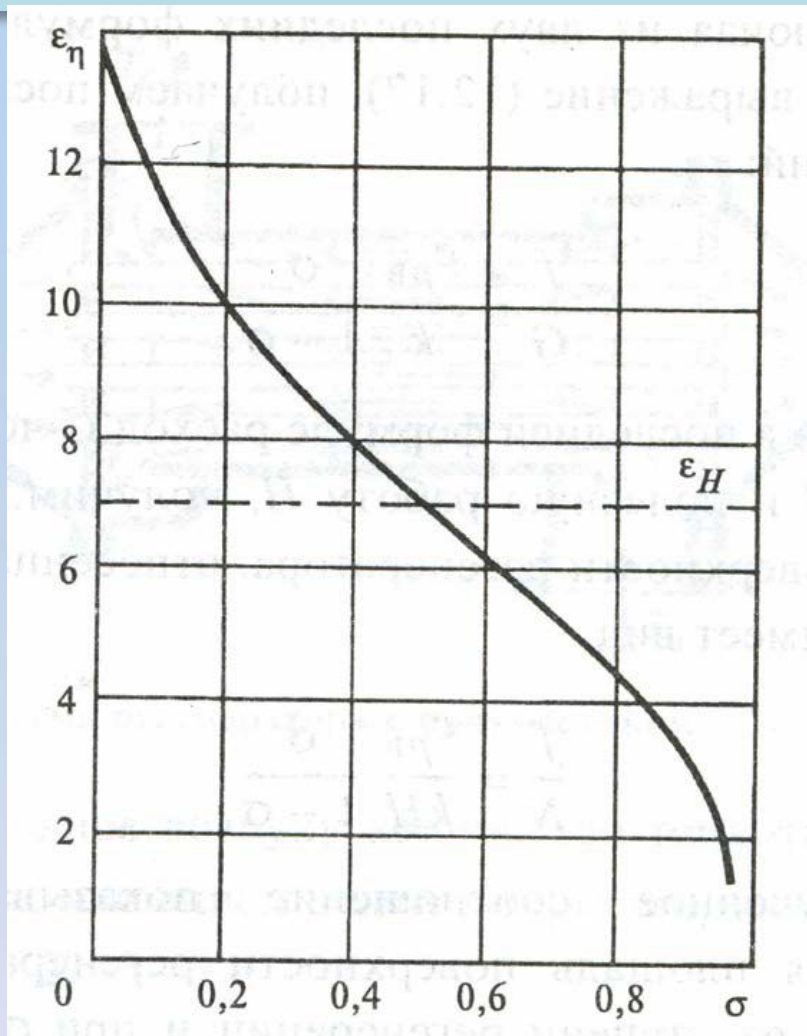
5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

Коэффициент полезной работы  $\varphi$  при введении регенерации заметно возрастает вследствие уменьшения  $\varepsilon_\eta$  ( $\varphi = (H_T - H_K) / H_T = \eta / \eta_T$ ),



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей



### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_k \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_k \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_k > 14$  (до 30, в перспективе до 35).



## 6. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУР $T_1$ и $T_3$ И КПД АГРЕГАТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

При оценке влияния температур  $T_1$  и  $T_3$ , КПД турбины и компрессора, а также ряда других факторов (потерь давления в трактах, механических потерь, которые рассматриваются далее) на характеристики ГТУ необходимо иметь в виду существенную особенность ГТУ, отличающую ее от других тепловых двигателей: полезная мощность ГТУ составляет некоторую долю от мощности, развиваемой самой газовой турбиной. Эта доля определяется коэффициентом полезной работы  $\varphi$  который для газотурбинной установки равен около 0,4—0,8 т.е. значительно меньше, чем, например, для паротурбинной установки, где коэффициент полезной работы близок к единице. Чем меньше коэффициент полезной работы, тем более чувствительна установка (ее КПД и мощность) к изменению аэродинамических, механических и других потерь в ее агрегатах. Если, например, в паротурбинной установке какие-нибудь потери составляют 1 % работы расширения турбины, то полезная мощность ГТУ за счет этих потерь также снижается приблизительно на 1 %. В газотурбинной установке потеря, равная 1 % мощности турбины, составляет  $1/\varphi$  процентов полезной мощности, так что при  $\varphi$ , равном, скажем, 0,4, снижение мощности ГТУ составляет 2,5 %.



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

По этой же причине относительное изменение температур  $T_1$  или  $T_3$  вызывает сравнительно большее относительное изменение КПД, удельной работы и коэффициента полезной работы ГТУ ( $\varphi = (H_T - H_K) / H_T = H / H_T$ ).

Рассмотрим теперь количественное влияние указанных факторов на  $\eta$ ,  $\varphi$  и  $H$  ( $H = H_T - H_K$ ). Ввиду достаточно сложной структуры формул удобно воспользоваться методом малых отклонений, т.е. определять изменение  $\eta$ ,  $\varphi$  и  $H$  при малом изменении  $T_3$  или любого другого параметра.

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С);
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



## Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\kappa} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} > 14$  (до 30, в перспективе до 40).

(10)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\kappa} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\kappa} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , в перспективе до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\kappa} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

(12)

5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_{\kappa} \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_{\kappa} > 14$  (до 30, в перспективе до 40)





## Влияние КПД турбины и компрессора на $\eta$ , $\varphi$ и $H$

### 5. По параметрам рабочего тела различают:

- низкотемпературные ГТУ –  $T_3 \leq 750$  °С;
- среднетемпературные ГТУ –  $750 \leq T_3 \leq 900$  °С;
- высокотемпературные ГТУ –  $900 < T_3$  (до 1350 °С, в перспективе до 1500 °С);
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_K \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_K \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_K > 14$  (до 30, в перспективе до 40)



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Формула (13) подтверждает вывод о существенном влиянии потерь в турбине и компрессоре на полезную работу (мощность) ГТУ. Изменение КПД турбины или компрессора на 1 % вызывает соответственное изменение  $H$  на  $1/\varphi$  или  $1/\varphi-1$  процентов. КПД компрессора оказывает меньшее влияние на  $H$ , чем КПД турбины, так как сама мощность компрессора меньше, чем мощность турбины, и ее изменение на 1 % ведет к меньшему изменению полезной мощности ГТУ, чем при изменении на 1 % мощности турбины. По тем же причинам коэффициент полезной работы существенно зависит от потерь в турбине и компрессоре, что видно из (14).

Относительное приращение КПД, как видно из (4) ,

- 5. По параметрам рабочего тела различают:
  - низкотемпературные ГТУ -  $T_3 \leq 750$  °C;
  - среднетемпературные ГТУ -  $750 \leq T_3 \leq 900$  °C;
  - высокотемпературные ГТУ -  $900 < T_3$  (до 1350 °C, в перспективе до 1500 °C)
- ГТУ с низкой степенью сжатия воздуха  $\pi_c \leq 8$ ;
- ГТУ со средней степенью сжатия воздуха  $8 < \pi_c \leq 14$ ;
- ГТУ с высокой степенью сжатия воздуха  $\pi_c > 14$  (до 30, в перспективе до 40)

зависит не только от  $\varphi$ , но и от степени регенерации  $\sigma$ . Влияние регенерации на  $\Delta\eta/\eta$  станет ясным, если учесть, что изменение  $\eta_T$  ведет к изменению располагаемого перепада температур  $T_4 - T_2$ . Так, при уменьшении  $\eta_T$  температура за турбиной растет, вызывая увеличение располагаемой разности  $T_4 - T_2$ . Это ведет к увеличению доли теплоты, передаваемой воздуху в регенераторе, и, следовательно, к снижению количества теплоты, подводимой в камере сгорания. Значит, уменьшение  $\eta_T$  ведет не только к снижению полезной работы (что вызывает снижение КПД и учитывается коэффициентом  $\varphi$ , но одновременно служит причиной некоторого уменьшения количества теплоты подводимого в камере сгорания, причем это уменьшение тем больше, чем больше степень регенерации.



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Если регенерация отсутствует, то, как легко видеть, изменение  $\eta_T$  не влияет на расход теплоты и камере сгорания. Формула (15) отражает влияние обоих отмеченных факторов: в первом слагаемом множитель  $1/\varphi$  учитывает изменение  $\eta$  за счет изменения полезной работы, а множитель  $1-\sigma$ , характеризует влияние степени регенерации  $\sigma$ . Множитель же при  $\Delta\eta_k/\eta_k$  в (15) является произведением двух множителей:  $(1-\varphi)/\varphi$ , определяющего влияние КПД компрессора на КПД ГТУ в связи с изменением полезной работы, а также  $1-(1-\sigma)\eta$ , отражающего влияние регенерации. Природу этого влияния можно установить, рассуждая следующим образом.

С уменьшением  $\eta_k$  (при неизменных  $T_1$  и  $\varepsilon$ , растет температура за компрессором  $T_2$ , а следовательно, и температура за регенератором  $T_{2p}$ . Однако увеличение  $T_{2p}$  оказывается тем меньше, чем больше степень регенерации. Последнее утверждение легко понять, если рассмотреть, предельный случай  $\sigma=1$ , когда температура воздуха за регенератором равна  $T_4$ , т.е. вообще не зависит от  $\eta_k$ . Значит, для установок без регенерации или с малой степенью регенерации уменьшение КПД компрессора сильнее влияет на подвод теплоты в камере сгорания, чем в установках с высокой степенью регенерации. Полученные выводы полностью согласуются с формулой (15), из которой следует, что изменение КПД установки при изменении  $\eta_k$  на 1 % тем больше, чем меньше степень регенерации.



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

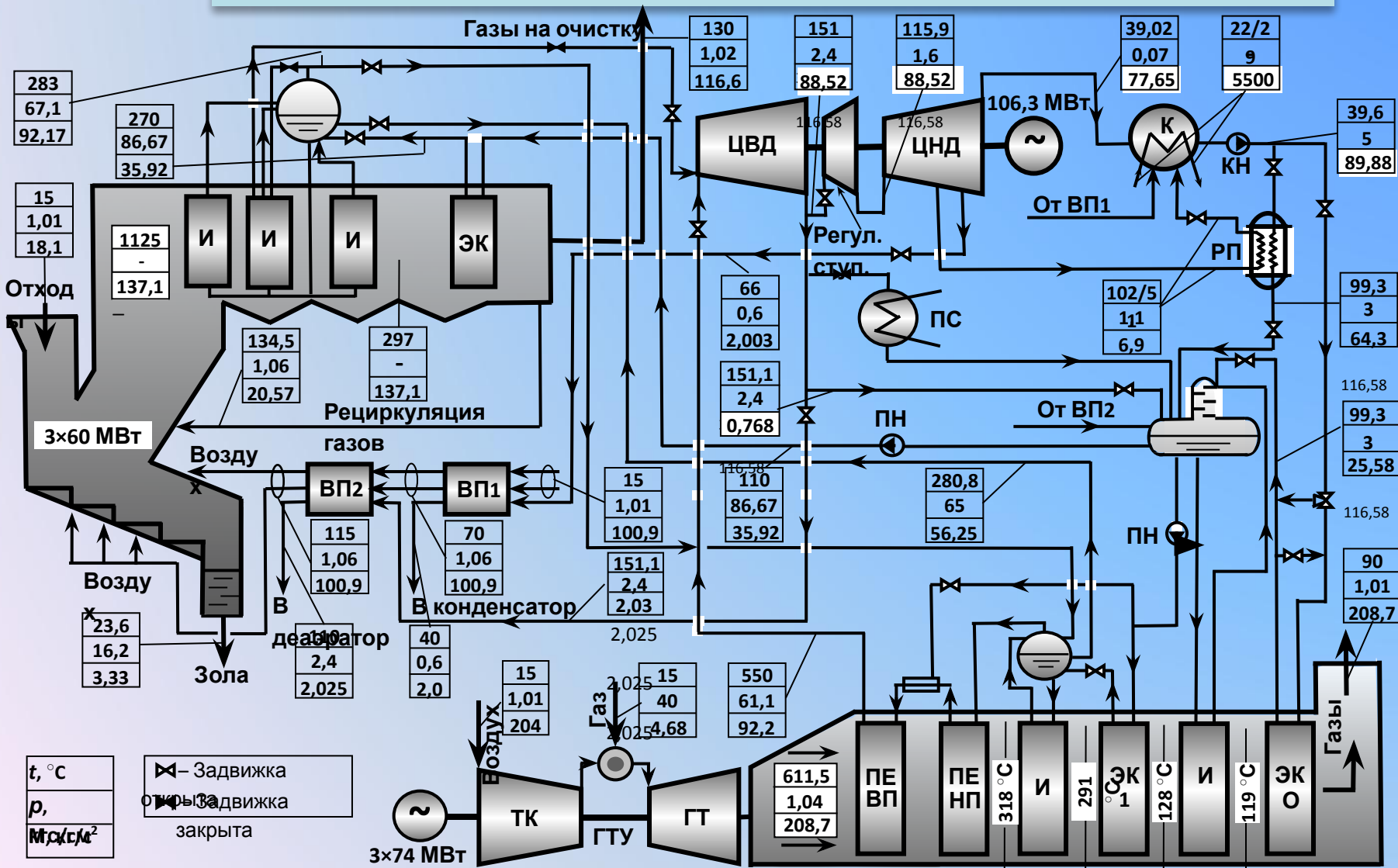


Рис. 2.7. Схема парогазовой ТЭС с газовой турбиной средней

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

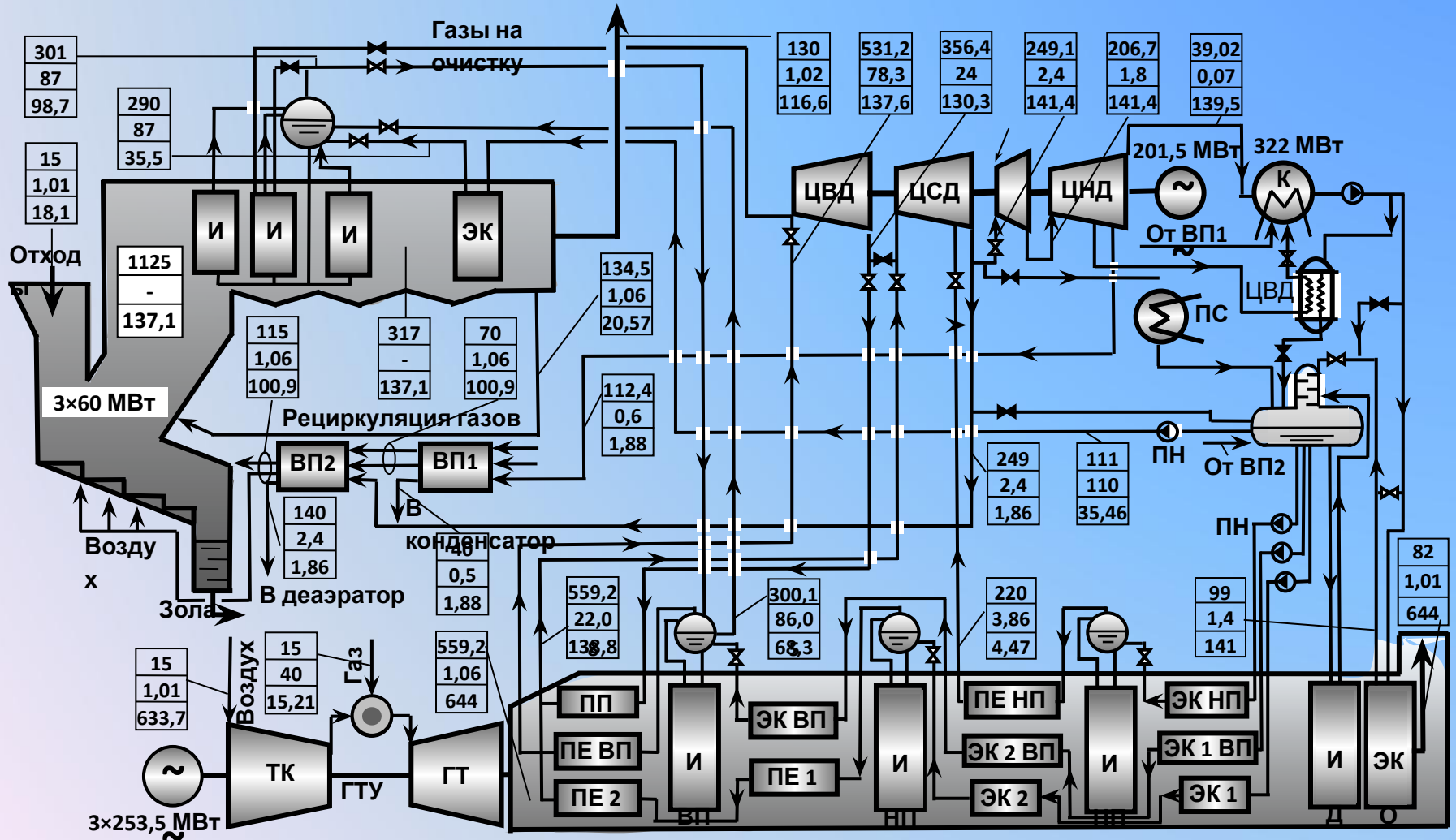


Рис. 2.8. Схема парогазовой ТЭС с газовой турбиной большой мощности



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительно малые габариты ГТУ делают не только привлекательным, но и реальным преобразование существующих паротурбинных энергоблоков в процессе их реконструкции в ПГУ путем их надстройки ГТУ в пределах существующих строительных конструкций. При довольно большой единичной мощности и высокой экономичности ПГУ также обладают высокой маневренностью, что позволяет использовать их в равной мере для покрытия как базовой, так и переменной части графиков нагрузки. В настоящее время мощные ПГУ работают главным образом на природном газе, который резервируется жидким топливом. Наряду с этим разрабатываются проекты и существуют опытные ПГУ на базе различных технологий газификации угля.

Развитие теплоэнергетики характеризуется своеобразным соревнованием между паросиловыми и газотурбинными установками и их термодинамическими циклами. Отсутствие соответствующих технологий не позволяло использовать продукты сгорания органического топлива в качестве рабочего тела, а водяной пар применялся как промежуточное рабочее тело. Параллельное развитие газовых и паровых термодинамических циклов не привело к антагонизму. Удалось максимально использовать их положительные свойства, создав комбинированную парогазовую установку. В ней теплота выхлопных газов ГТУ в значительной мере используется в паровой ступени объединенного термодинамического цикла Брайтона–Ренкина. В конденсационном режиме лучшие энергетические ПГУ отпускают электроэнергию с КПД (нетто), составляющим 60 % и более.

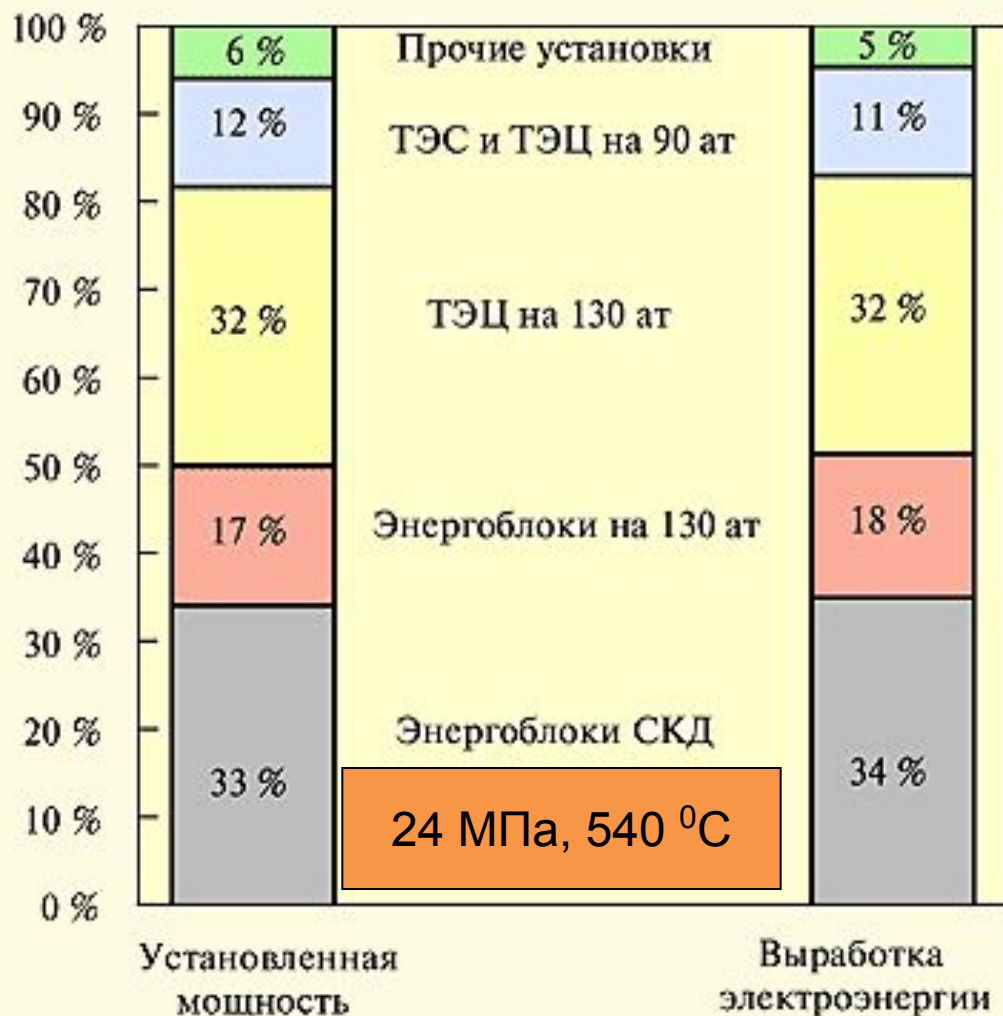


**Спасибо за внимание !**





## Структура установленной мощности и выработки электроэнергии на ТЭС России



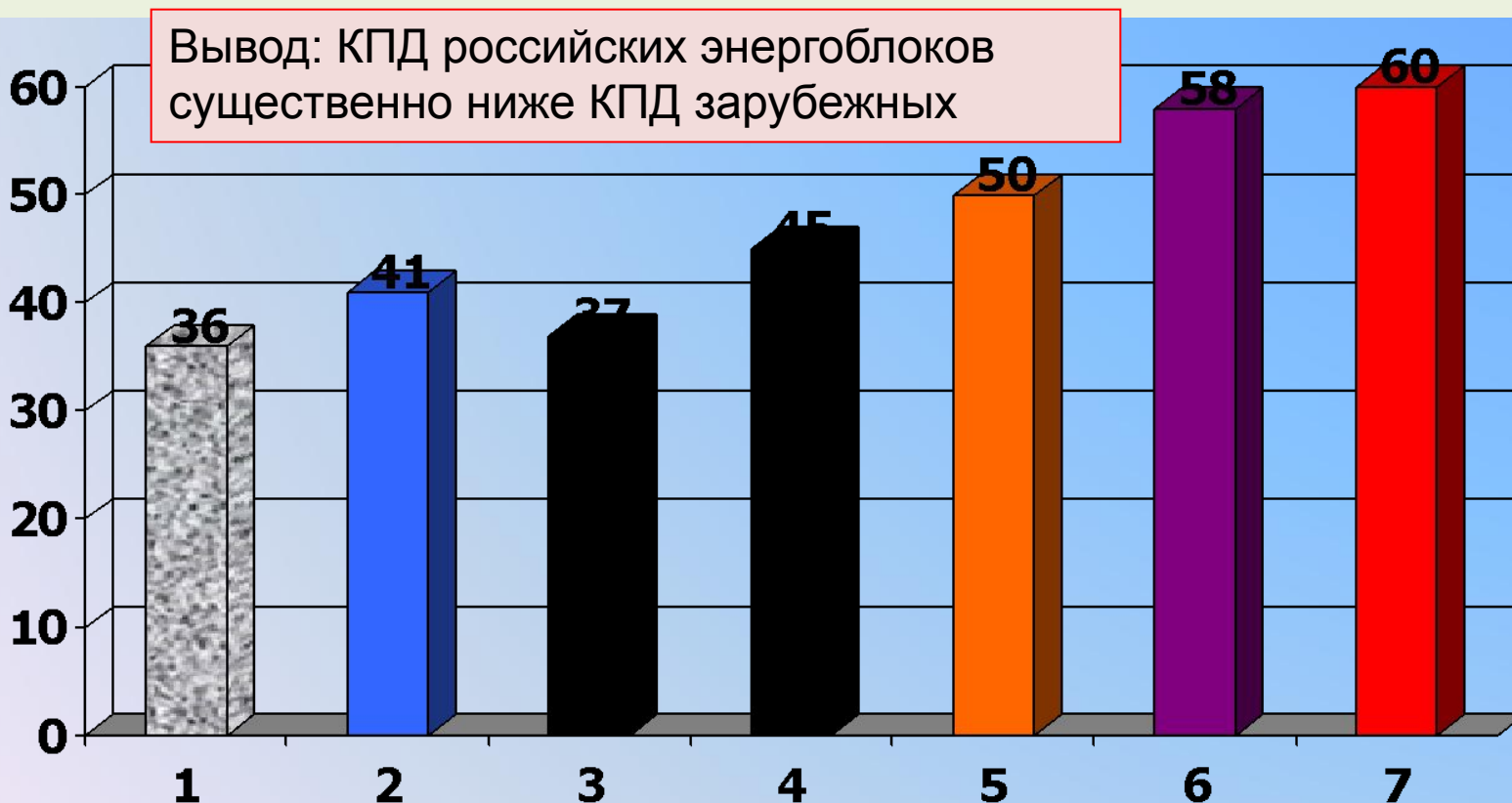
Практически отсутствуют:

- ГТУ
- ПГУ
- Угольные ТЭС на суперсверхкритические параметры

Вывод: Параметры пара большинства ТЭС России существенно ниже по сравнению с последними достижениями в области освоения ССКП



## Сравнение КПД российских и лучших зарубежных энергоблоков



1 – средний КПД по России; 2 – лучшие газовые блоки России; 3 – лучшие угольные блоки России; 4 – средний КПД угольных блоков Запада; 5 – КПД ПГУ-450Т в конденсационном режиме; 6 – средний КПД строящихся западных ПГУ; 7 – КПД ПГУ, достигнутый на одном новейшем энергоблоке



## Годы выпуска головных образцов паровых турбин

Тип турбин	Год выпуска
Т-100-130	1961
К-300-240	1961
К-200-130	1958
К-800-240	1970 (1975, 1982)
на 90 ат (8,8 МПа)	1945—1950
Т-250-240	1972
К-1200-240	1978

Вывод: основные типы паровых турбин разработаны 30 – 60 лет назад (морально устарели)



## Действующие ПГУ России

- ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга (блок №1 - 2000 г., блок №2 – 2006 г.)
- ПГУ-190 Дзержинской ТЭЦ (2003 г.);
- ПГУ-215 Тюменской ТЭЦ (2004 г.)
- Две ПГУ-39 Сочинской ТЭЦ (2004 г.)
- ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2 (2005 г.)
- ПГУ-325 Ивановских ПГУ (август 2007 г.)
- ПГУ-450Т ТЭЦ-27 Мосэнерго (ноябрь 2007 г., декабрь 2008 г.). Планируется еще 1 блок
- ПГУ-450Т ТЭЦ-21 Мосэнерго (лето 2008 г.)
- ПГУ-120 «Москва-Сити»: 2SGT800+ПТ
- ПГУ-130 в Строгине, Москва: 2SGT800+ПТ

Устаревшие и неудачные ПГУ:

- ПГУ-300 Южной ТЭЦ, Санкт-Петербург (1997 г.)
- ПГУ-170 Невинномысской ГРЭС (1972 г.)

**Суммарная мощность ПГУ - 3758 МВт (менее 2 % установленной мощности России)**



**Задача: тотальная замена  
устаревшего оборудования с  
созданием гармоничной  
энергетики на базе самых  
современных энергетических  
технологий**



# Направления развития теплоэнергетики

Топливный баланс ТЭС России

Жидкое топливо

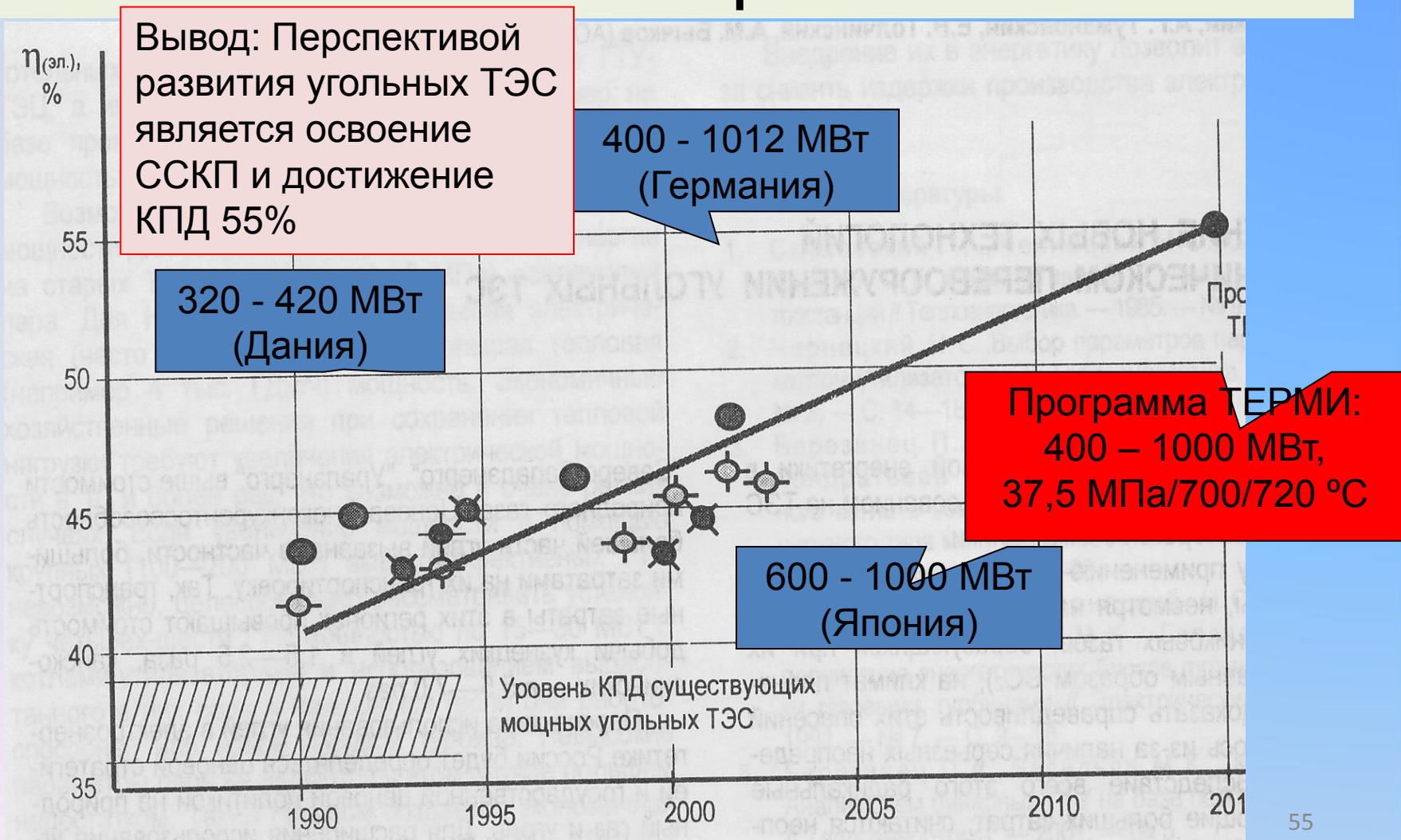


Строительство энергоблоков  
на параметры 26 – 30 МПа,  
580 – 600 град с промперегревом

Строительство утилизационных  
ПГУ-КЭС и ПГУ-ТЭЦ на базе  
мощных  
высокотемпературных ГТУ



# Экономичность энергоблоков ССКП





Главное направление развития энергетики России с использованием природного газа – освоение парогазовых технологий, в частности:

- высокотемпературных мощных высокоэкономичных ГТУ с температурой уходящих газов 580-600 °С;
- котлов-утилизаторов трех давлений с промперегревом и параметрами генерируемого пара традиционных ТЭС докритического давления;
- современных высокоэкономичных паровых турбин трех давлений на повышенные параметры пара и глубоким вакуумом.





## Выводы по состоянию теплоэнергетики России

1. Преобладание физически и морально устаревшего оборудования, в том числе электротехнического и сетевого.
2. Низкая экономичность и высокие эксплуатационные расходы.
3. Низкий уровень использования современных энергетических технологий – ПГУ и ПСУ суперсверхкритических параметров пара.



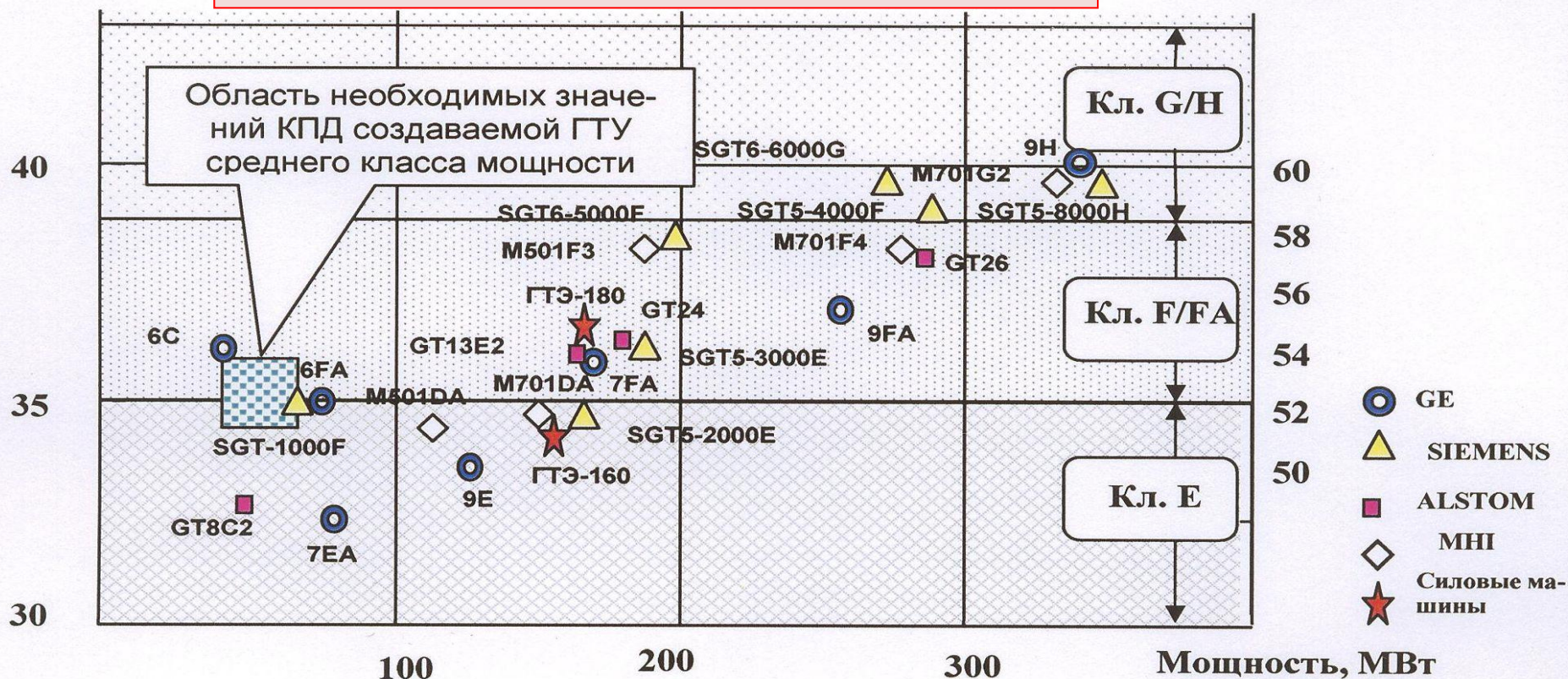
Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

# Технический уровень современных ГТУ

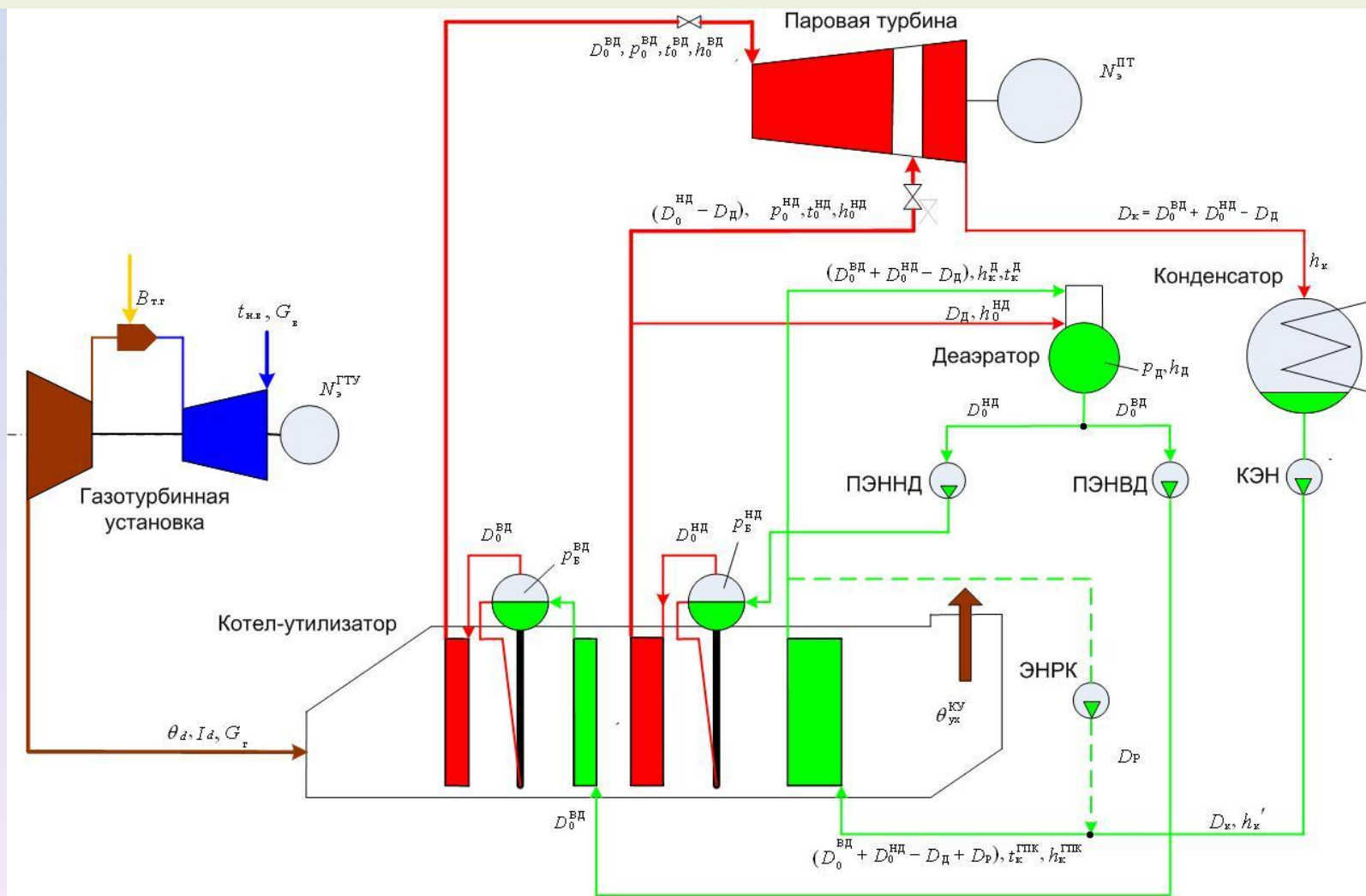
Вывод: технический уровень современных ГТУ позволяет достигать КПД в комбинированном цикле ПГУ до 60%

КПД  
ГТУ, %

КПД  
ПГУ, %



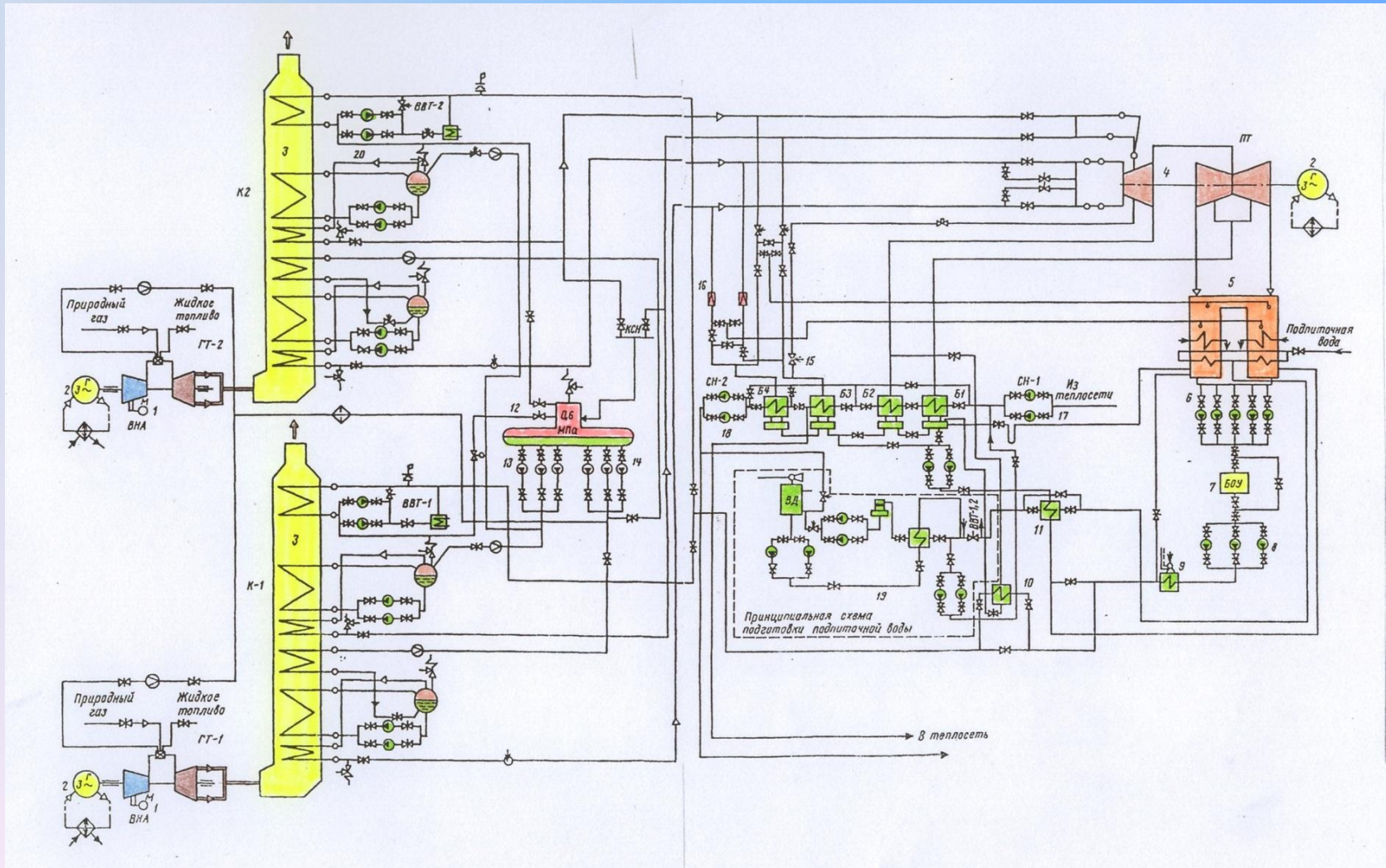
# Тепловая схема ПГУ-400





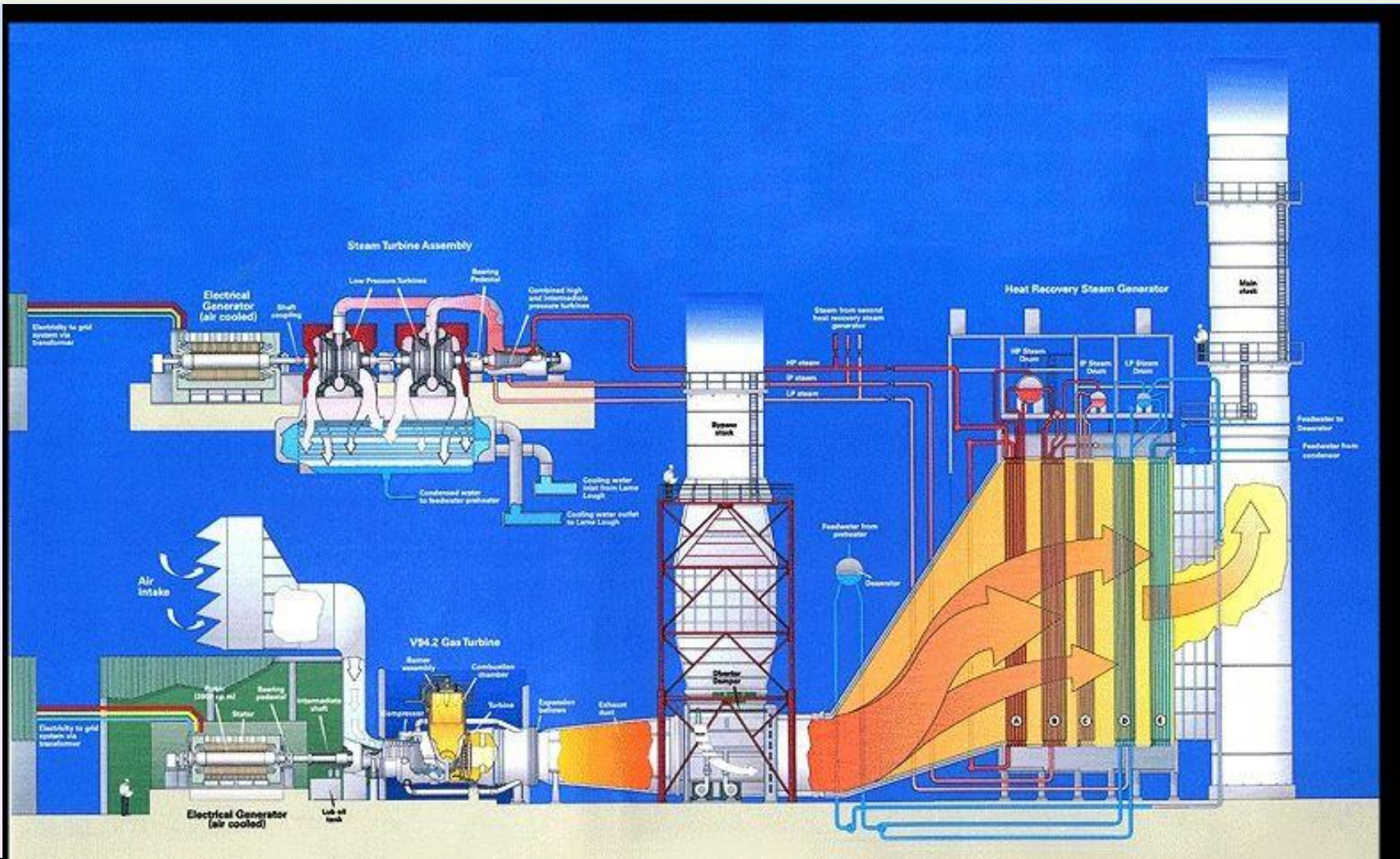
Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

# Тепловая схема ПГУ-450Т





# Принципиальная конструктивная схема ПГУ





# Сравнительный анализ технико-экономической эффективности современных источников тепловой и электрической энергии



# Преимущества и недостатки утилизионных ПГУ

## Преимущества:

- Чрезвычайно высокая экономичность (50 – 60%)
- Малая потребность в охлаждающей воде (примерно 30% от потребности ПСУ такой же мощности) из-за малой доли паротурбинной мощности, компактная низкопотенциальная часть электростанции
- Простота конструкции основного оборудования из-за отсутствия сжигания топлива в котле-утилизаторе и отсутствия системы регенерации
- Высокая маневренность, определяемая маневренными возможностями только паровой турбины
- Малые собственные нужды

## Недостатки:

- Необходимость в «благородном» топливе - природном газе
- Полная зависимость электро- и теплоснабжения от надежности ГТУ



## Сравнение по экономичности энергетических установок

Лучшая ПГУ по сравнению с К-800-23,5

$$\eta^{пту} = 0,40 \qquad \eta^{пгу} = 0,6$$

$$\Delta q/q = 1 - (\eta^{пту} / \eta^{пгу}) = 1 - (2/3) = 0,33 \rightarrow 33\%$$

ПГУ -450 по сравнению с К-800-23,5

$$\eta^{пту} = 0,40 \quad \eta^{пгу} = 0,5$$

$$\Delta q/q = 1 - (0,40/0,50) = 0,2 \rightarrow 20\%$$

Лучшая ПГУ по сравнению с лучшей ПТУ

$$\eta^{пту} = 0,48 \qquad \eta^{пгу} = 0,6$$

$$\Delta q/q = 1 - (0,48/0,60) = 0,2 \rightarrow 20\%$$





Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Себестоимость отпуска электроэнергии в мире, цент/(кВт·ч)	
Угольная ТЭС	2,4 ÷ 3,3
ПГУ на природном газе	1,6 ÷ 2,55
АЭС с реакторами ВВЭР-1000	1,8 ÷ 3,24
Удельные капитальные затраты на создание электрогенерирующего оборудования, \$/кВт установленной мощности (2000 – 2010 гг.)	
ГТУ	325
Комбинированный цикл (ПГУ)	535
ТЭС паротурбинная	1150 ÷ 1470
Усовершенствованные ТЭС	1350 ÷ 1600
Котлы с ЦКС под давлением	1340 ÷ 1370
Котлы с ЦКС при атмосферном давлении	1370 ÷ 1400
Котлы с газификацией угля	1435 ÷ 1450
АЭС	1500 ÷ 2500
Волновые установки берегового типа	4800
Приливные электростанции	1840 ÷ 3680
ГЭС большой мощности	1840 ÷ 2760
ГЭС малой мощности	1150 ÷ 3450
Ветровые электростанции берегового типа	1200
Солнечные электростанции	3220
Установки на биомассе	1700 ÷ 2760



## Сроки ввода объектов энергетики в эксплуатацию, лет

Паросиловые ТЭС	6 ÷ 8
ПГУ	1 ÷ 3
АЭС	7 ÷ 10



Сравнительный анализ технико-  
экономической эффективности паросиловой  
ТЭС и ПГУ с одинаковой установленной  
мощностью 200 МВт



## Характеристики паросиловой ТЭС

Паросиловая установка с двумя турбинами  
2× Т-100-130,  
параметры пара: 130 бар и 565 град С.  
Установленная электрическая мощность –  
200 МВт,  
Установленная тепловая мощность – 372  
МВт



## Характеристики ПГУ

ПГУ Юго-Западной ТЭЦ в составе

2×ГТД V64/3A – 66 МВт<sub>т4</sub>;

2×КУ Пр-100/14,8-9,3/0,75-535/245

1×ТП SST-600 – 69 МВт;

Установленная электрическая мощность- 200  
МВт;

Установленная тепловая мощность (без  
учета водогрейных котлов) – 157 МВт.

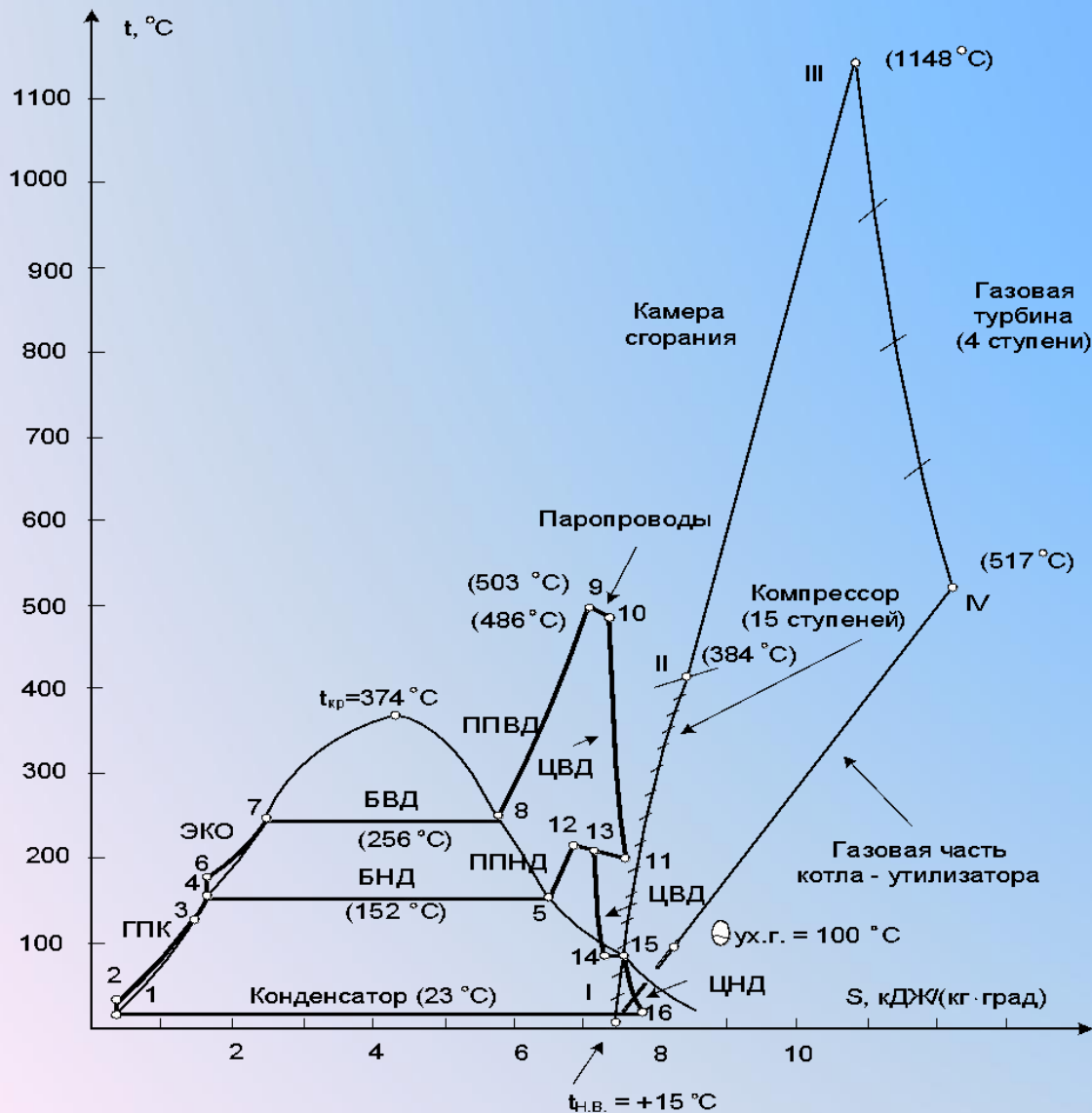


Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Технико-экономические показатели	Значения	
	Паросиловая ТЭС	ПГУ
Установленная электрическая мощность, МВт	200	200
Установленная тепловая мощность	372	157
Электрическая мощность при работе в теплофикационном режиме, МВт	120	170
Электрический КПД в конденсационном режиме, %	36	53,3
Электрический КПД в теплофикационном режиме	21	46
Коэффициент использования топлива в теплофикационном режиме, %	88	88
Расход рабочего тела в паротурбинном цикле, т/ч	491	238
Расход в системе технического водоснабжения, т/ч	11800	5700
Утечки из цикла «пар-конденсат», т/ч	5	2,3
Утечки воды технического водоснабжения, т/сутки	708	342



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

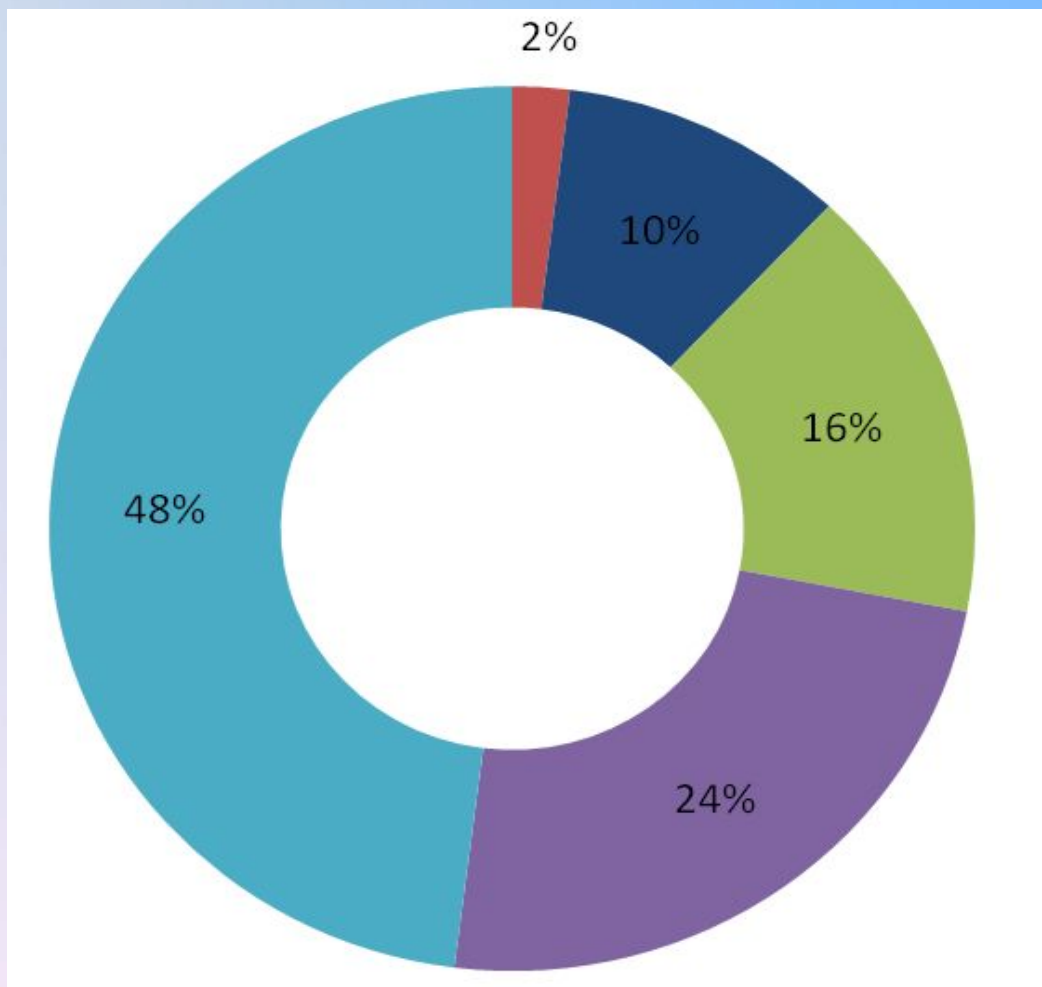


t,s-диаграмма полублока  
ПГУ-325



Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Мировой рынок энергетического оборудования



Российские компании -2 %  
Siemens -10 %  
Alstrom -16 %  
GE -24 %  
Другие – 48 %





Доклад окончен.  
Спасибо за внимание !