

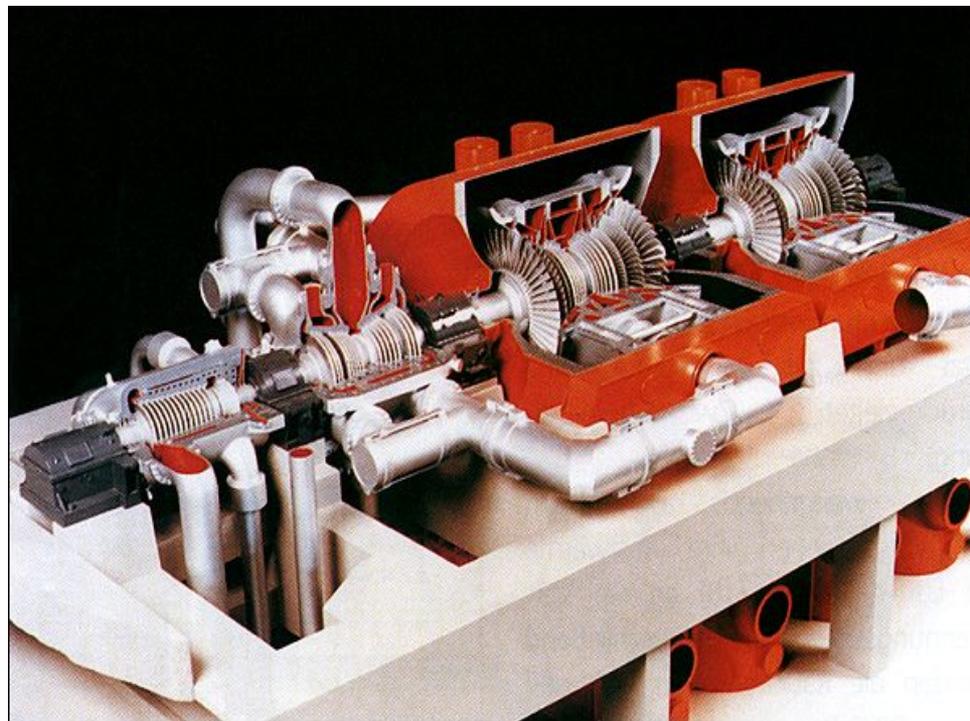
# Турбины ТЭС и АЭС. Часть 1

## Теория теплового процесса



Курс – 3;  
Семестр – 5;  
Вид отчетности – экзамен;

Лекций – 34 час.;  
Практик – 17 час.;  
РГЗ



Слайд-конспект лекций для направления 140100 – теплоэнергетика

Автор: проф. П.А.Щинников каф. ТЭС, НГТУ, г.Новосибирск, 2011

# Таблица соотношения

пяти и пятнадцатилетних систем оценки знаний студентов по курсу «Турбины ТЭС и АЭС» **Часть 1**, направления 140100 – теплоэнергетика

15-и бальная система	F 0-24		FX 25-49		E 50-59	D- 60-69	D 60-69	D+ 60-69	C- 70-79	C 70-79	C+ 70-79	B- 80-89	B 80-89	B+ 80-89	A- 90-100	A 90-100	A+ 90-100
5-и бальная система	неуд до 50					удовл 50-75			хорошо 76-85			отл 86-100					
100 бальная переходная система	Практики		Лекции				Экзамен										
	практика	РГЗ	лекция	Контр. Раб.			экзамен										
	8	18	4	30			40										
	26		34 балла				40 баллов										
Минимально допустимый балл	3	10	1	16			20										
	13		17				ИТОГО 20										
	ИТОГО 30					ИТОГО 50											

# Таблица соотношения

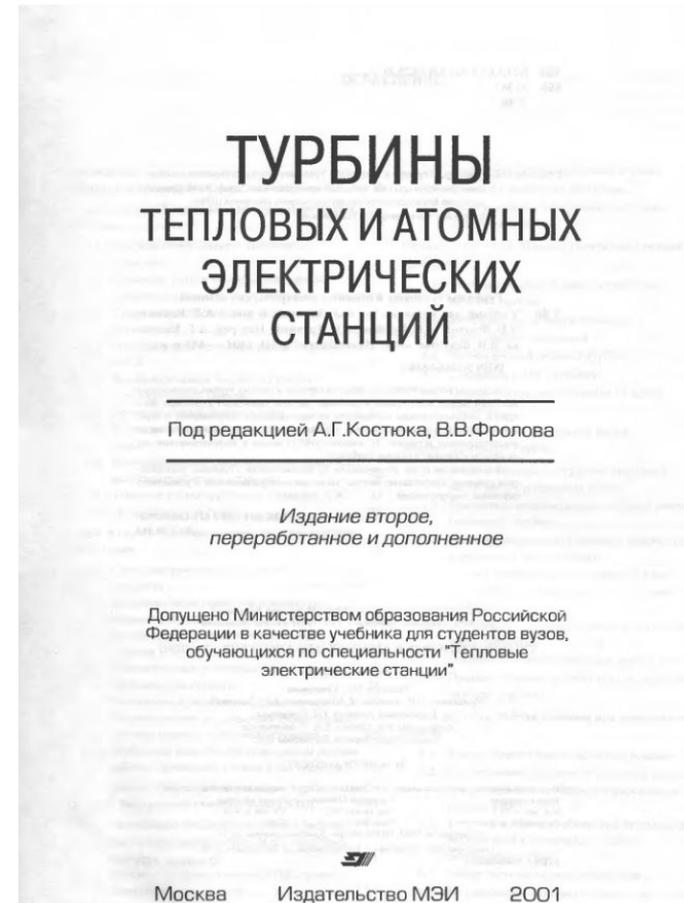
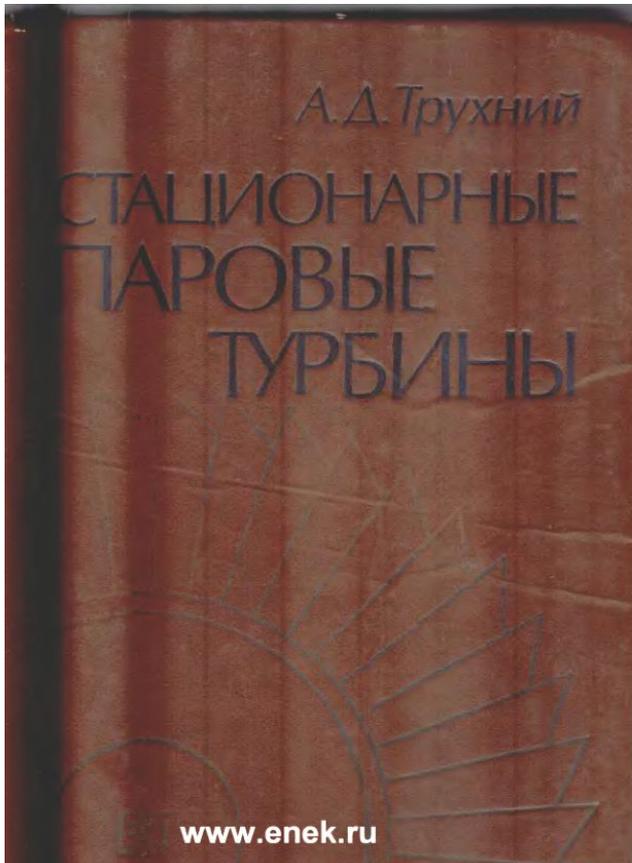
пяти и пятнадцатилетних систем оценки знаний студентов по курсу «Турбины ТЭС и АЭС» **Часть 2**, направления 140100 – теплоэнергетика

15-и бальная система	F		FX			E		D- D D+ C- C C+		B- B B+		A- A A+		
	0-24		25-49			50-59		60-69		70-79		80-89		90-100
5-и бальная система	неуд					удовл			хорошо			отл		
	до 50					50-75			76-85			86-100		
100 бальная переходная система	Практики				Лекции				Экзамен					
	практика		КП		лекция		Контр. Раб.		экзамен					
	4		32		4		20		40					
	36				24 балла				40 баллов					
Минимально допустимый балл	1 17		1 11		20									
	18		12		ИТОГО 20									
	ИТОГО 30				ИТОГО 50									

# Литература



# Литература



# Литература



# Модуль 1

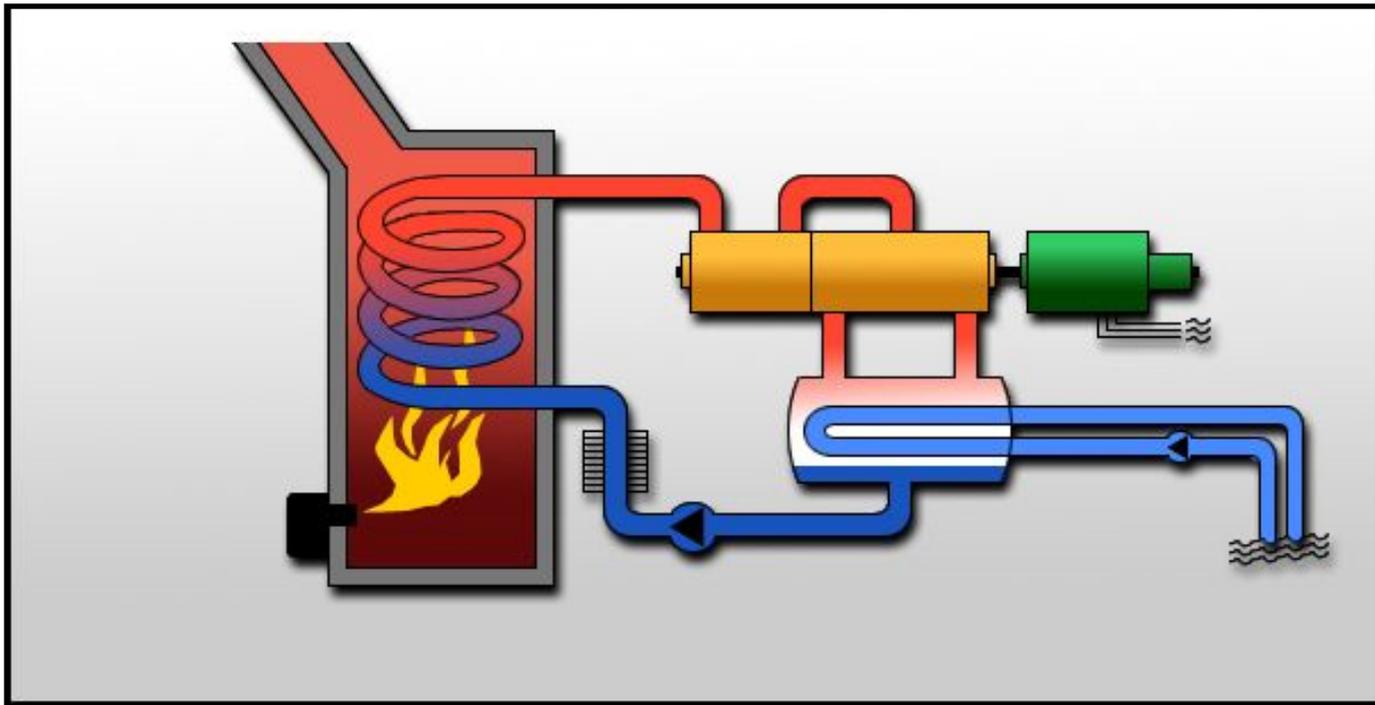
## Схемы и циклы ПТУ

# Лекция 1

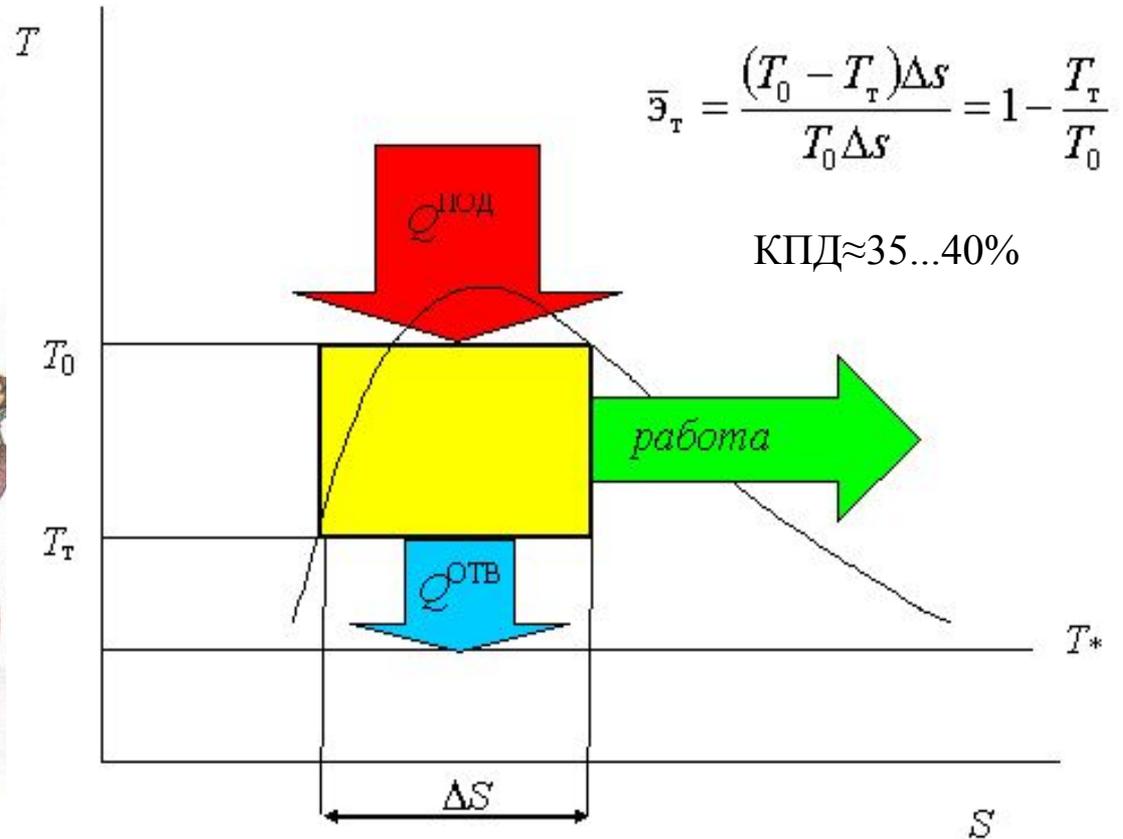
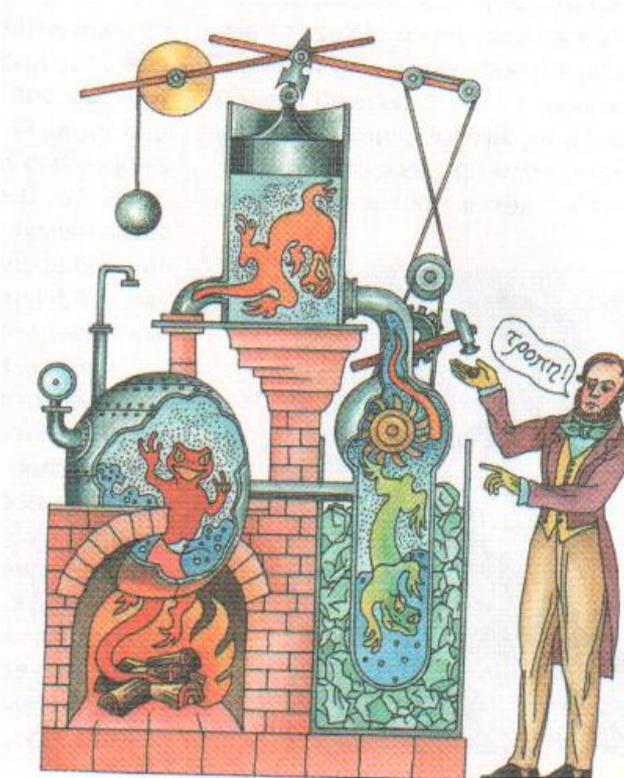
## История развития турбиностроения



# Преобразование энергии на ТЭС



# Теоретический цикл Карно



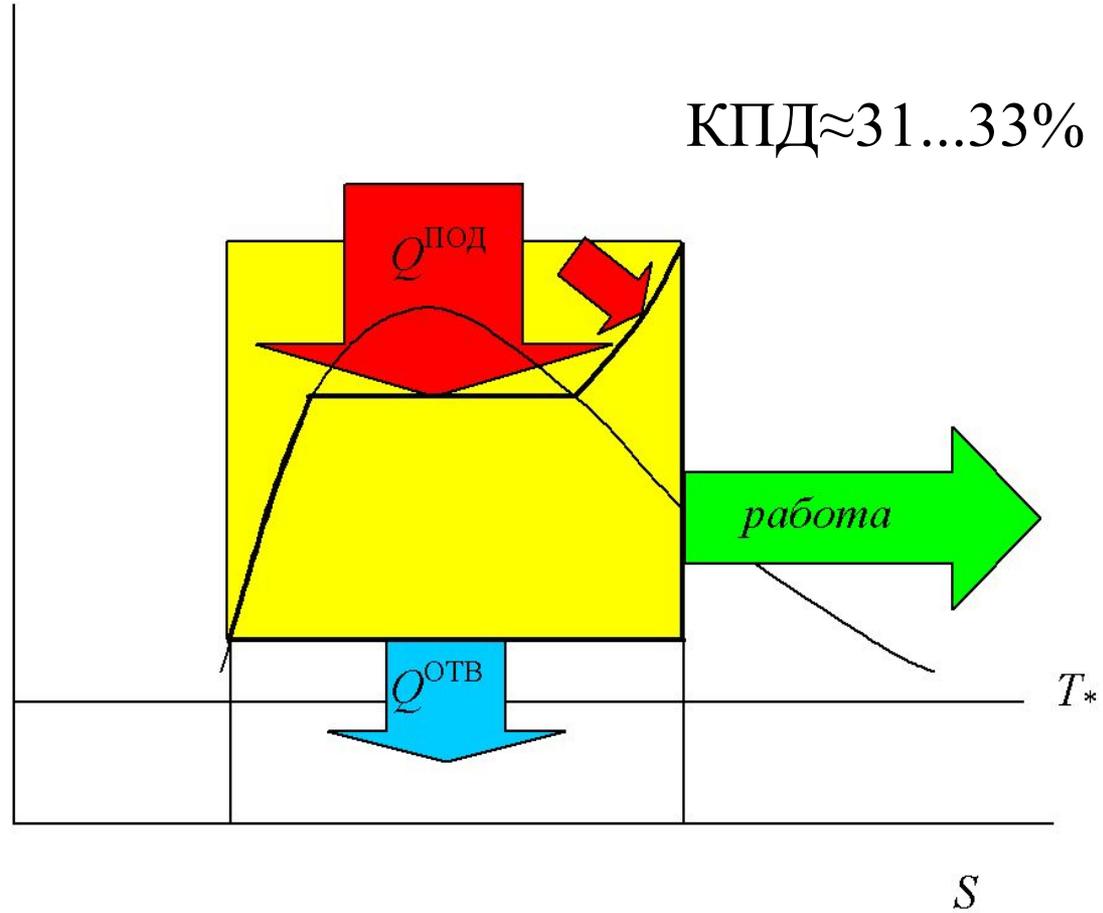
Для реальных параметров сегодняшнего дня КПД  $\approx$  60...70%

# Теоретический цикл Ренкина

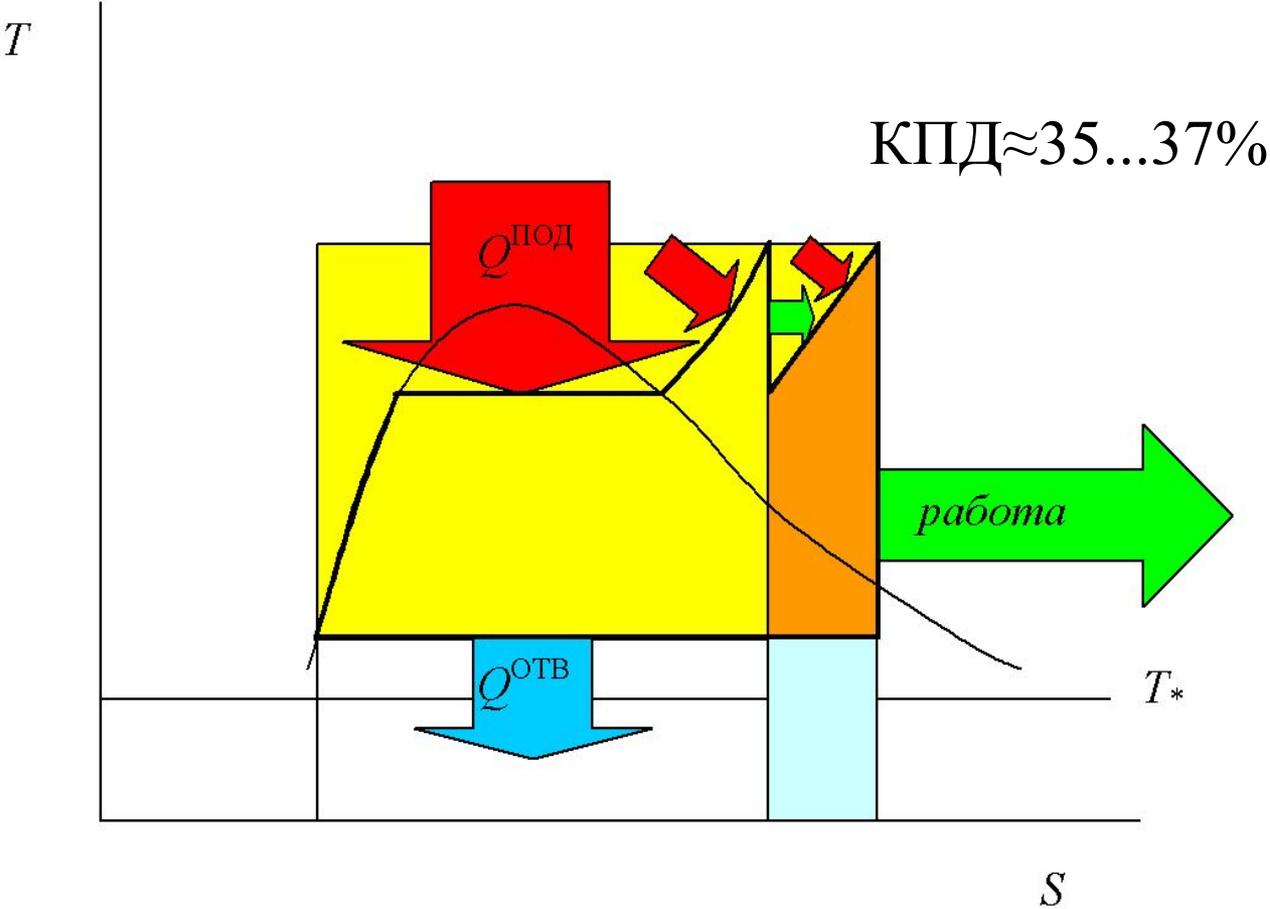


$T$

КПД  $\approx 31 \dots 33\%$



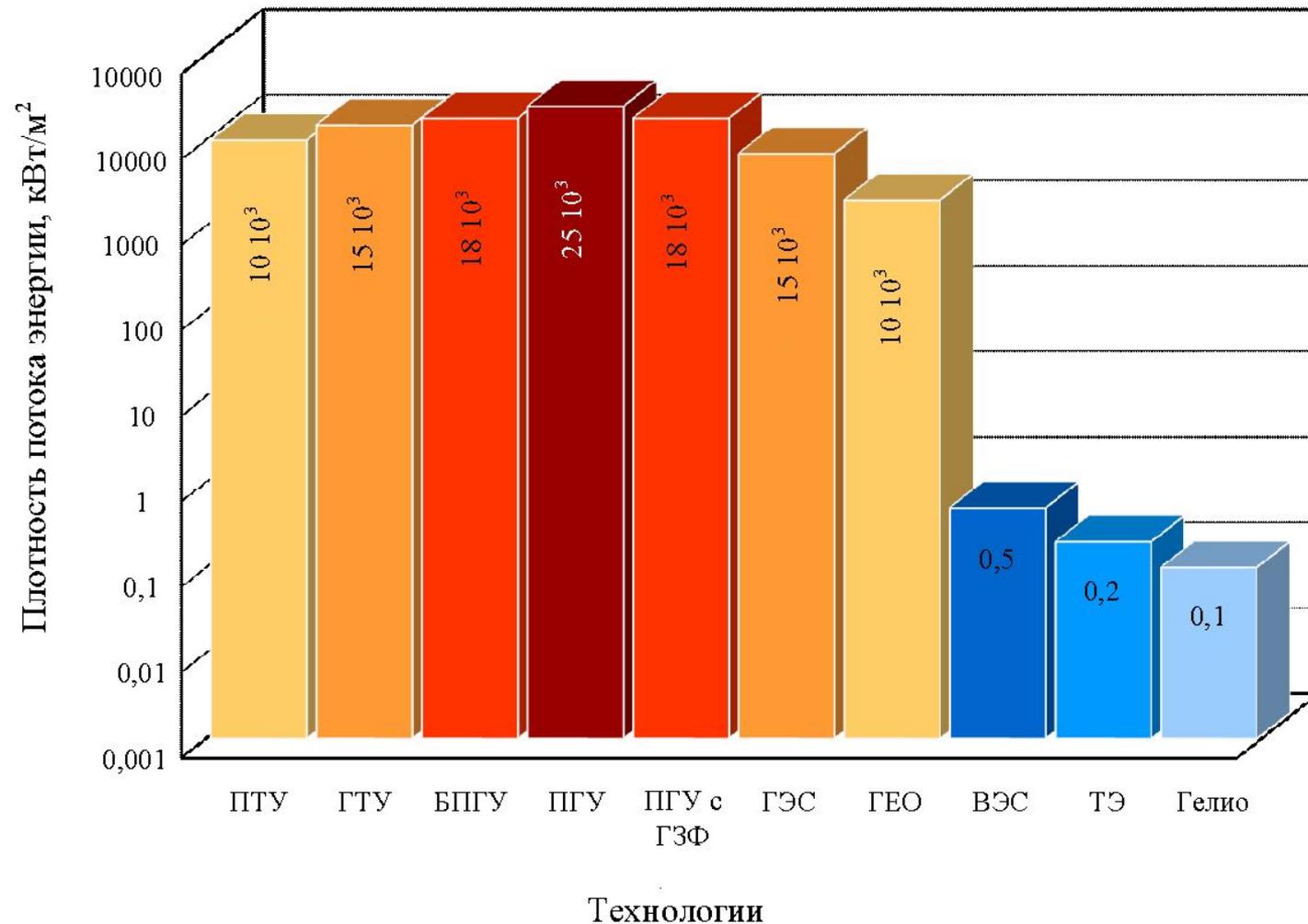
# Теоретический цикл Ренкина с промперегревом



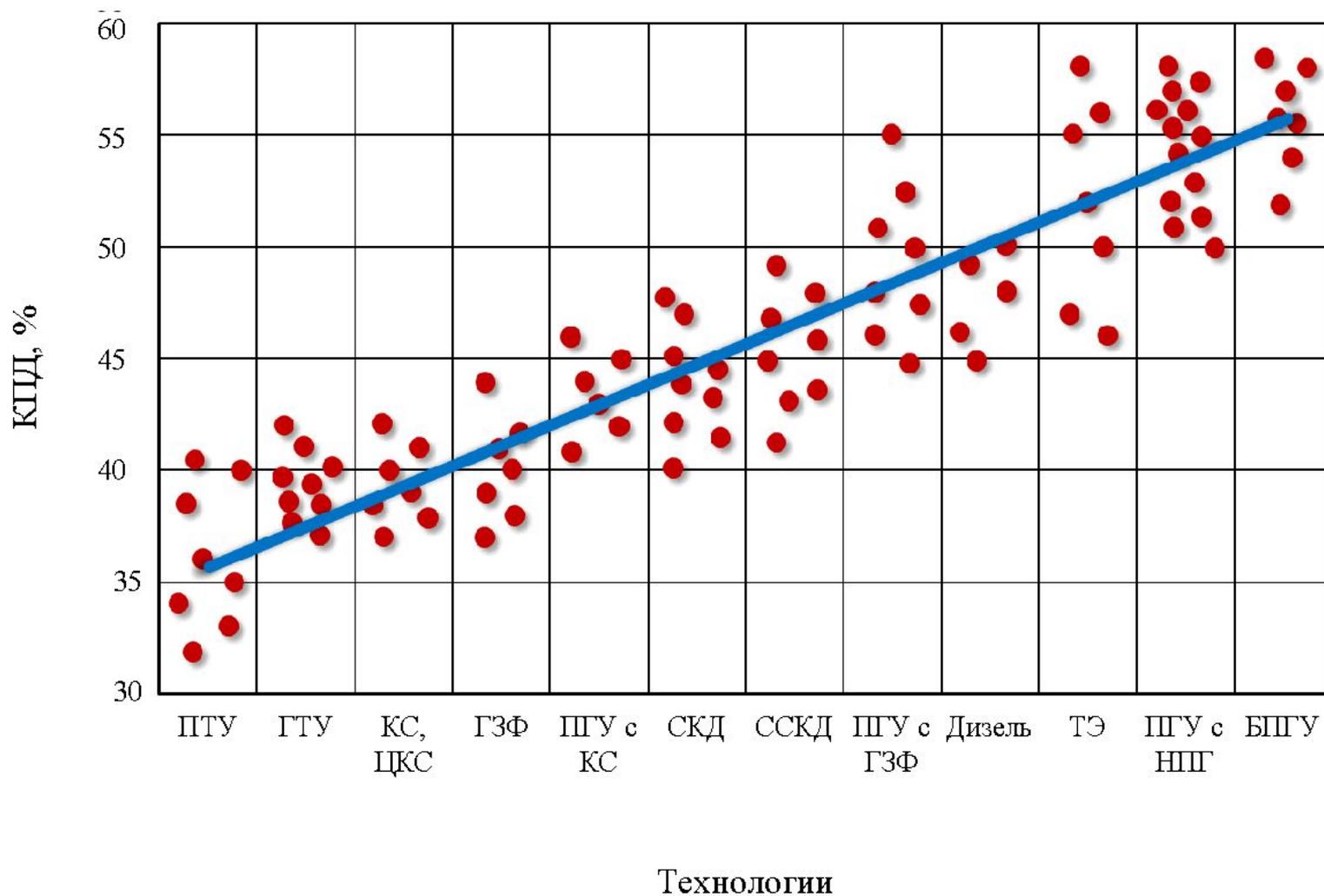
# Систематизация фазовых компонент углеводородных компонент в первичных энергоносителях

	Углеводородные компоненты		
Фазовое состояние	«С» + «Н»	«С» углерод	«Н» водород
«Т» твердое	<b>ДРОВА</b> До 1860 г.	<b>УГОЛЬ</b> 1860 г. – 1960 г.	Твердотопливные компоненты
«Ж» жидкое	<b>НЕФТЬ</b> 1960г. – 2020 г.	СЖТ из угля	Жидкотопливные компоненты
«Г» газообразное	<b>ГАЗ</b> С 2020 г.	СИНТЕЗ ГАЗ из угля	Газовое топливо

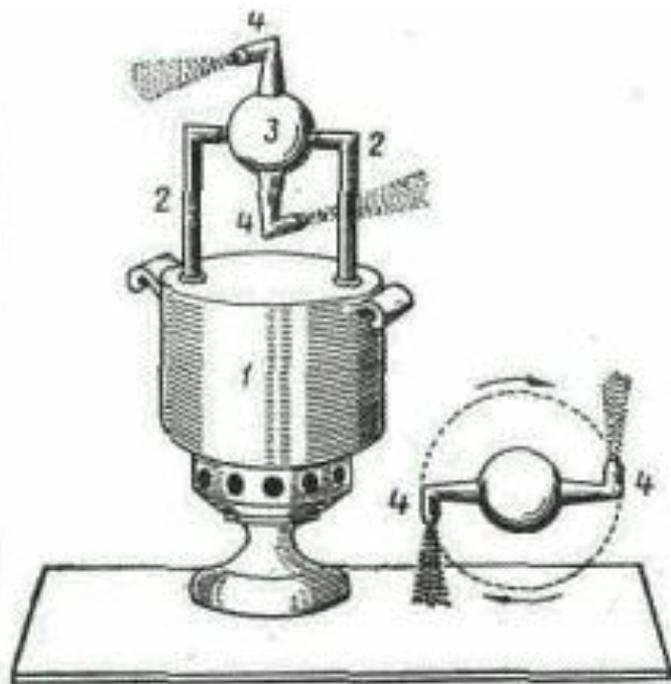
# Плотность потока энергии в зависимости от технологии



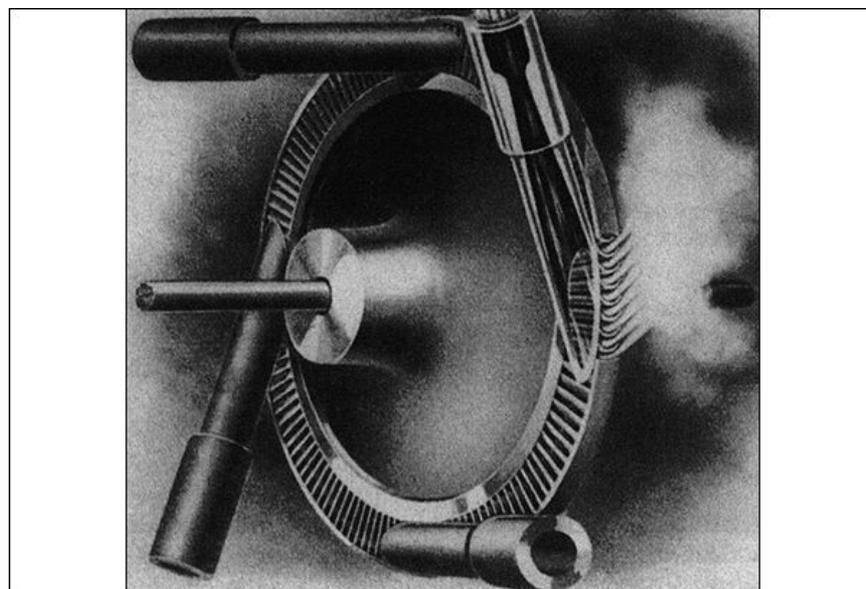
# Зависимость КПД от различных технологических процессов



# К истории развития турбиностроения



Эолипил Герона (около 100 д.н.э.)



Турбина Лавалья (1883 г.)

# Активная и реактивная турбины

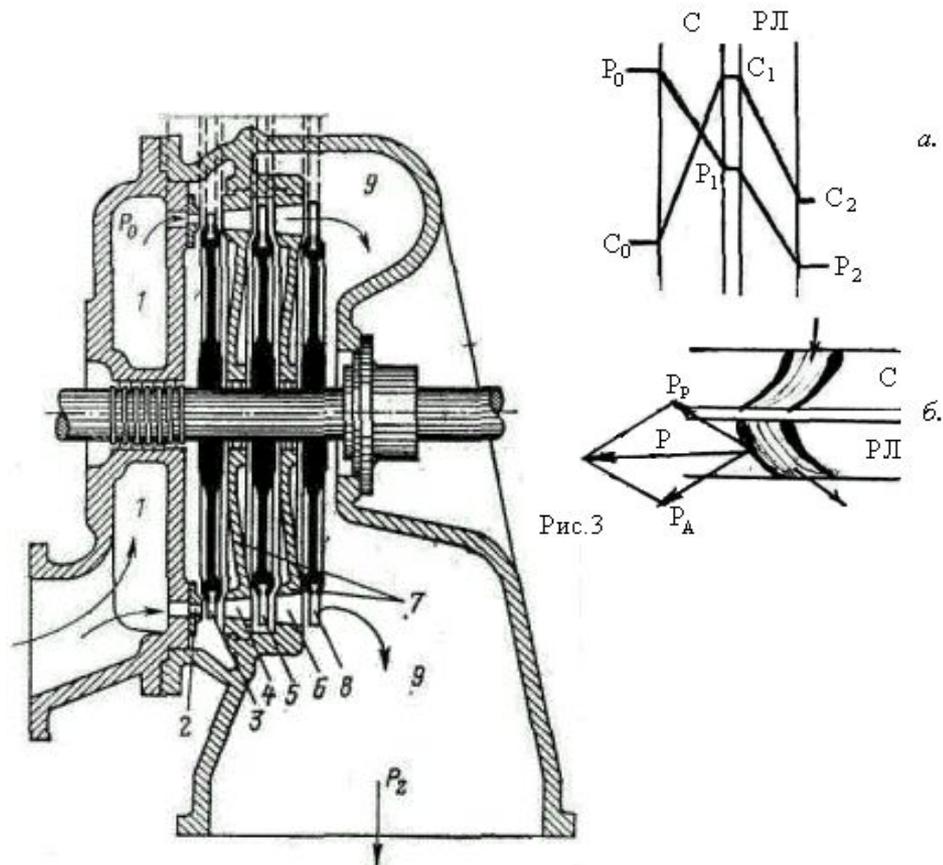
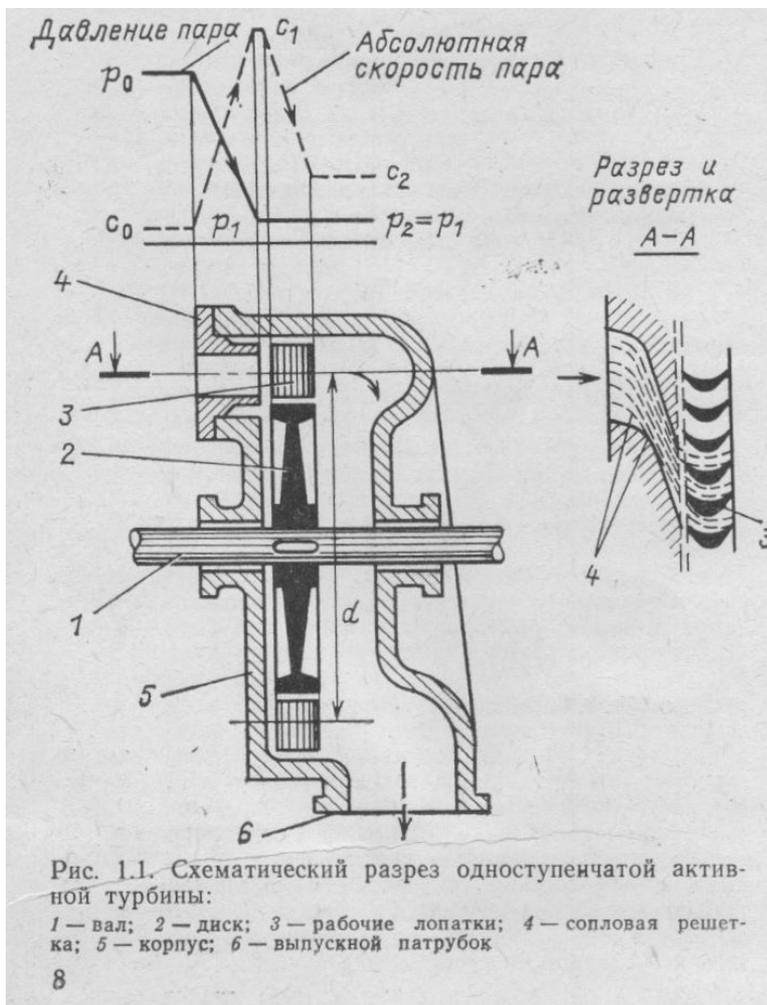
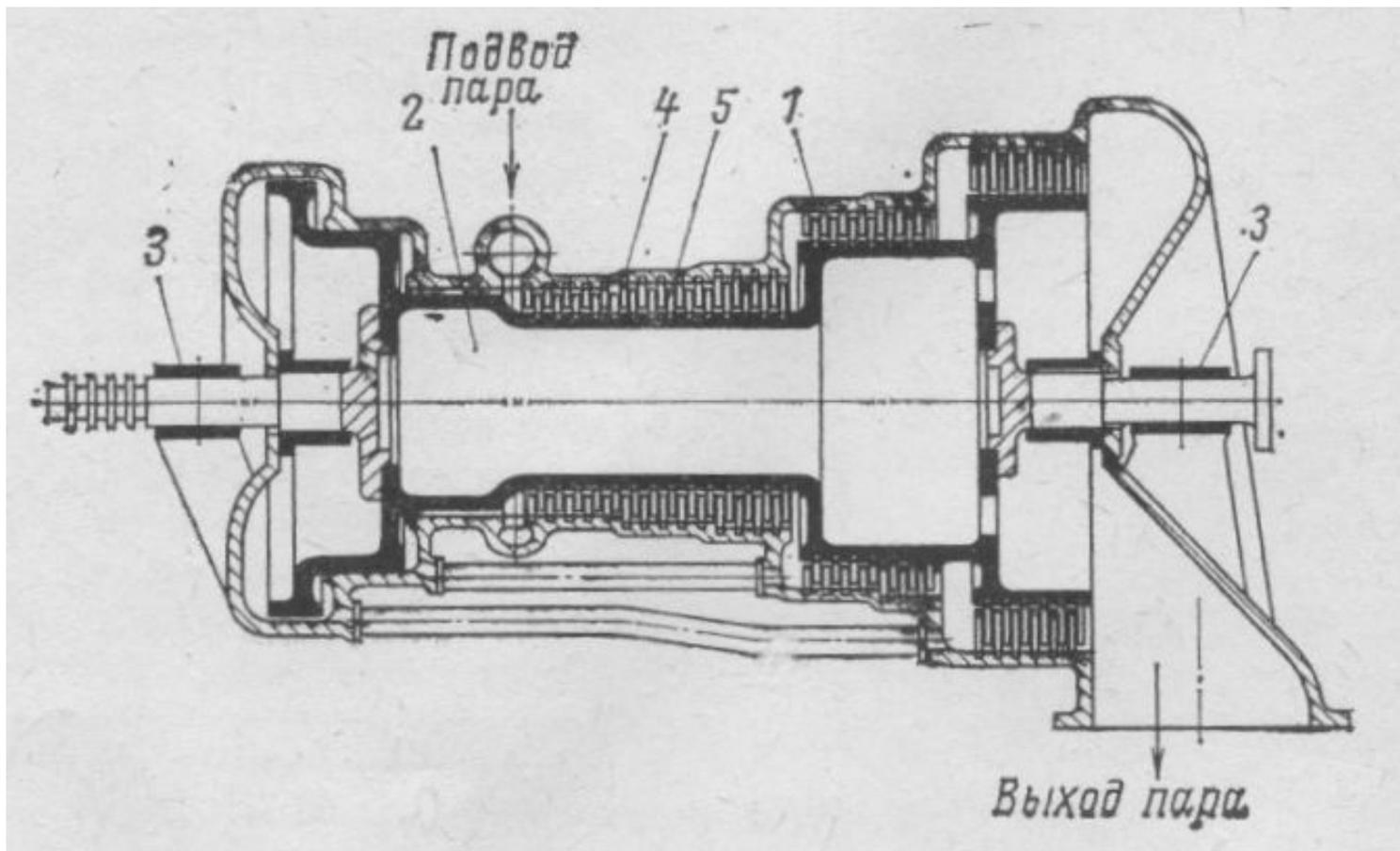


Схема реактивной турбины

## Пример многоступенчатой турбины

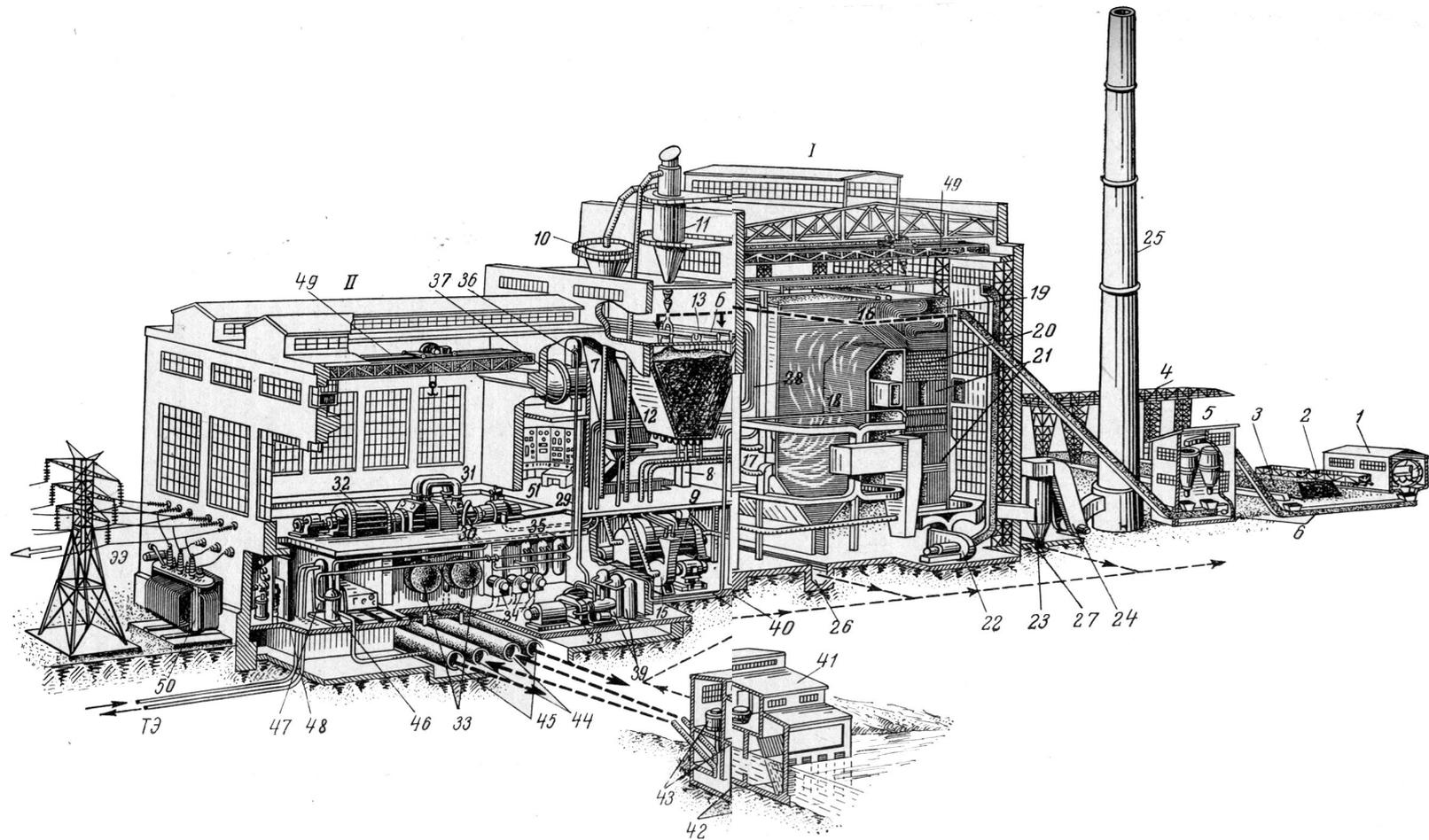


Многоступенчатая турбина

# Пример компоновки ТЭС



# Пример компоновки ТЭС



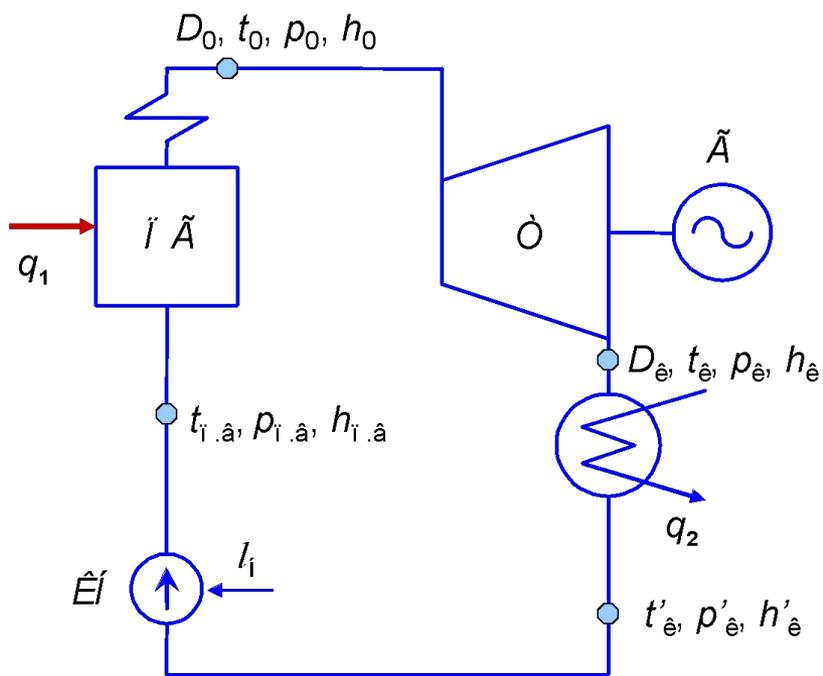
Исходными данными для компоновки главного здания являются: тип электростанции (КЭС, ТЭС, АЭС) и заданная мощность; тип и единичная мощность основных агрегатов, их габаритные размеры; вид используемого топлива; тепловая схема электростанции (блочная, неблочная); тип системы водоснабжения; климатические и сейсмические характеристики района

# Лекция 2

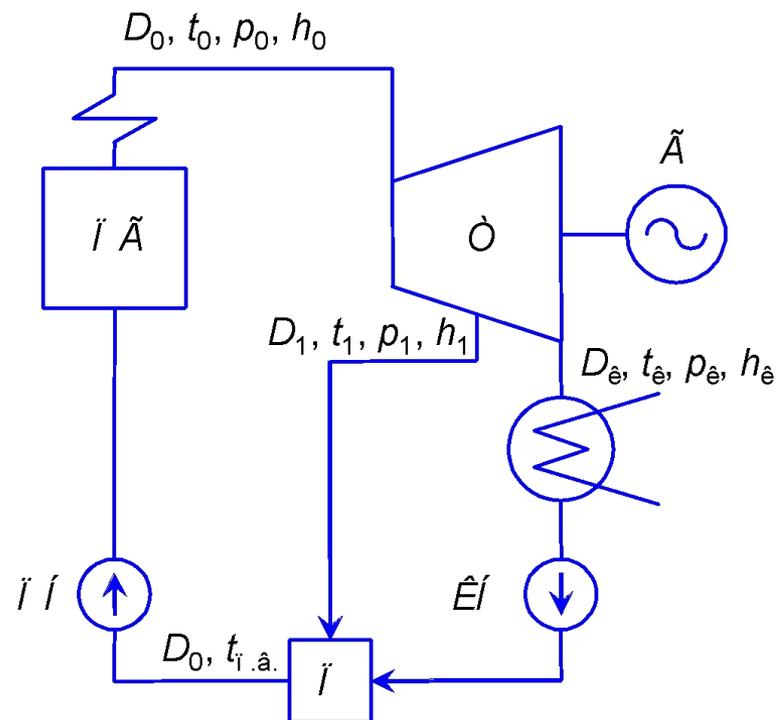
## Тепловые циклы паротурбинных установок



# Тепловые циклы ПТУ

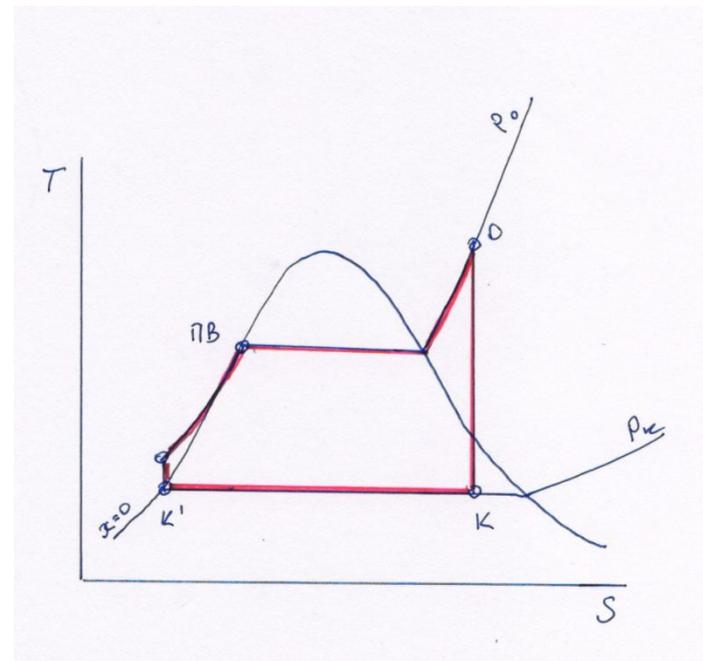
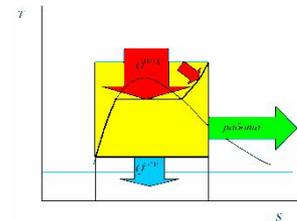
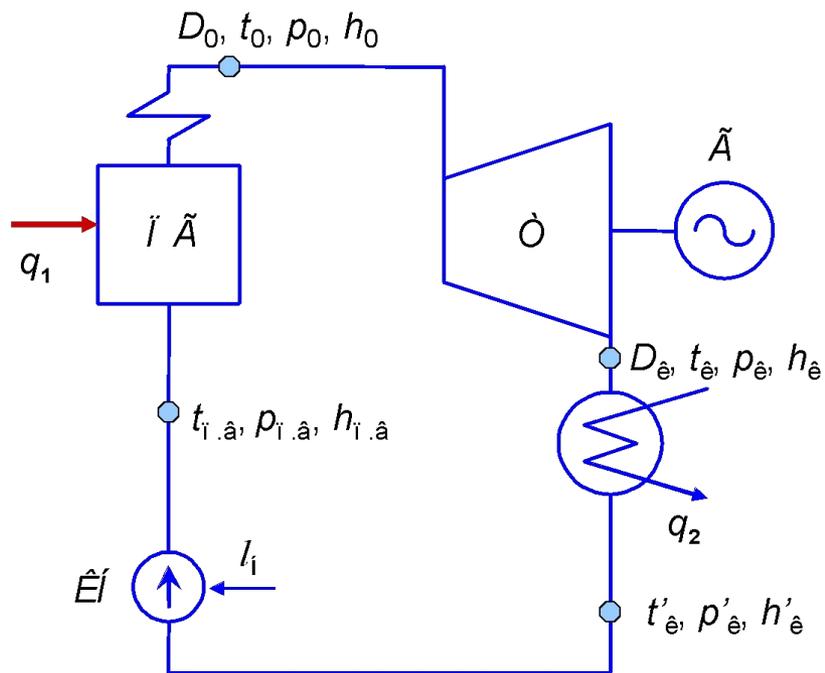


Без системы регенерации  
(простейшая)



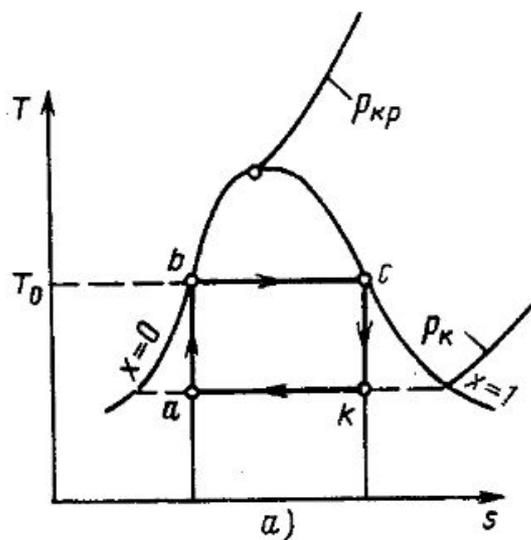
С регенерацией

# К определению КПД цикла Ренкина

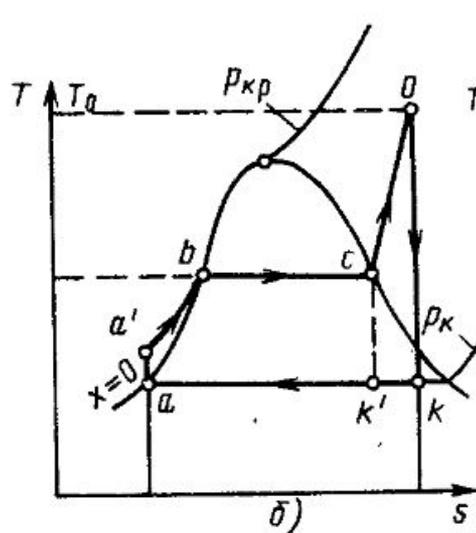


- Формулы писать самому на доске

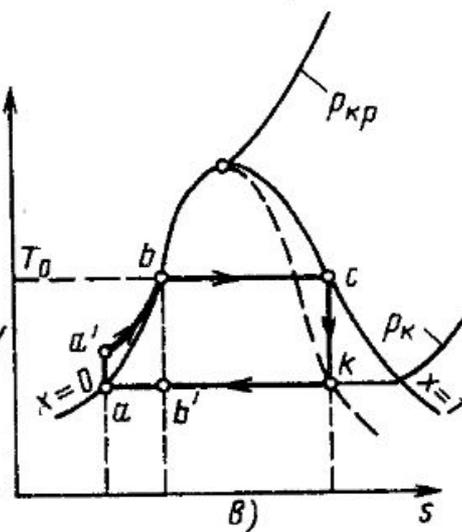
# Тепловые циклы паротурбинных установок



Карно



Ренкина



Насыщенного пара

# Реальный цикл Ренкина

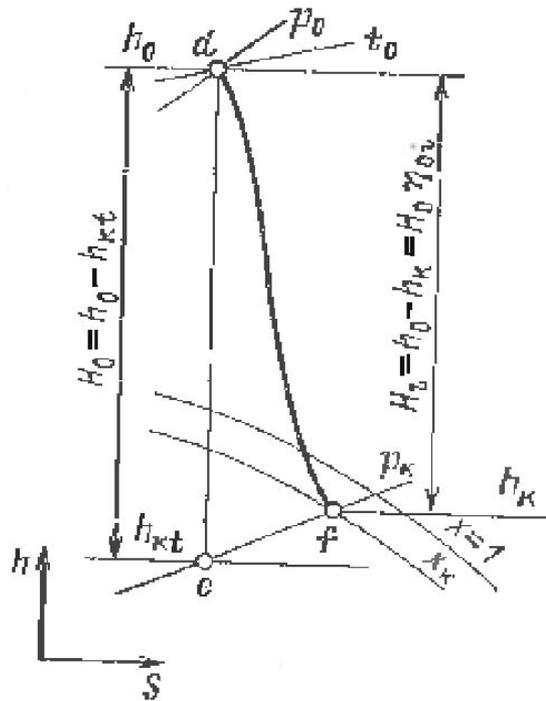


Рис. 18. Процесс расширения пара в турбине в  $h, s$ -диаграмме

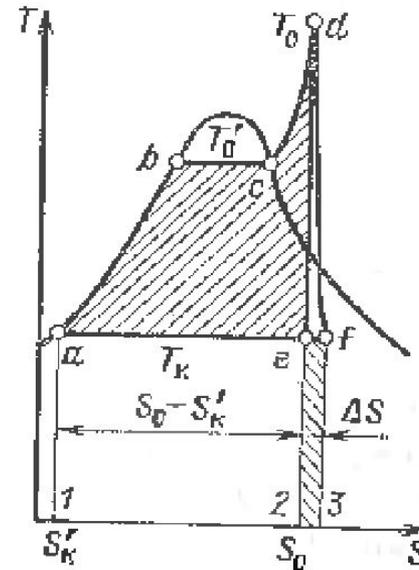


Рис. 19. Действительный тепловой цикл в  $T, s$ -диаграмме

- Формулы писать самому на доске

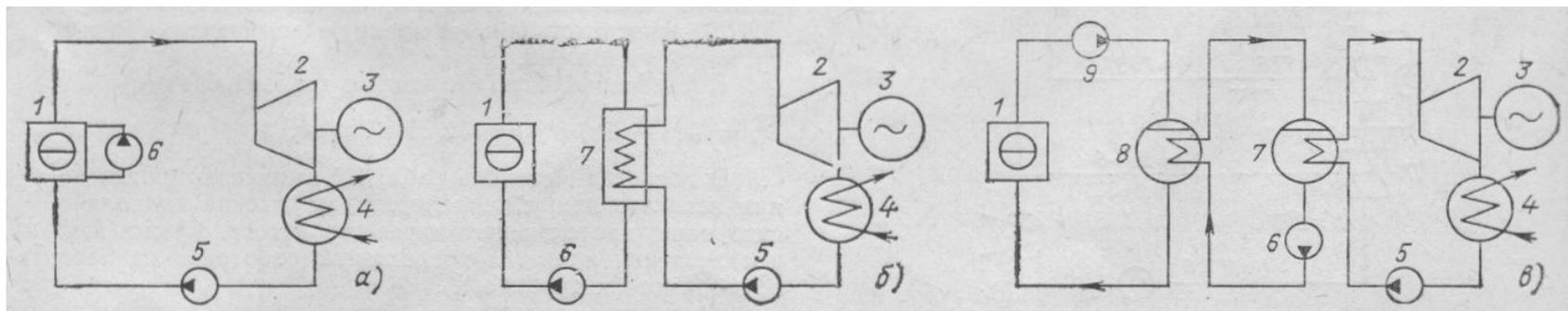
# Классификация КПД

7

Таблица 1.1. Классификация КПД

Наименование КПД	Относительный КПД	Абсолютный КПД турбинной установки	Мощность
При идеальной турбине	1	$\eta_t = \frac{H_0}{h_0 - h_x^*}$	$N_0 = GH_0$
Внутренний	$\eta_{oi} = \frac{H_i}{H_0}$	$\eta_i = \eta_t \eta_{oi}$	$N_i = GH_i = N_0 \eta_{oi}$
Эффективный	$\eta_{oe} = \eta_{oi} \eta_m$	$\eta_e = \eta_t \eta_{oe}$	$N_e = GH_0 \eta_{oe} = N_0 \eta_{oe}$
Электрический	$\eta_{oэ} = \eta_{oi} \eta_m \eta_{э.т}$	$\eta_{э} = \eta_t \eta_{э}$	$N_{э} = GH_0 \eta_{э} = N_0 \eta_{э}$

# Принципиальные тепловые схемы АЭС



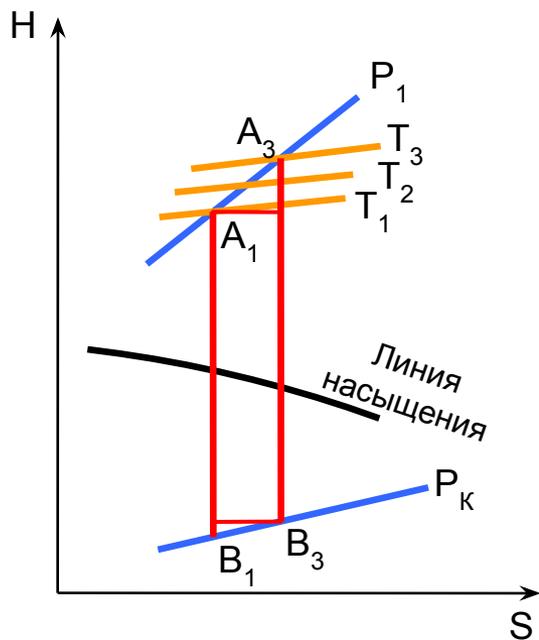
- А) одноконтурная;
- Б) двухконтурная;
- В) трехконтурная

# Лекция 3

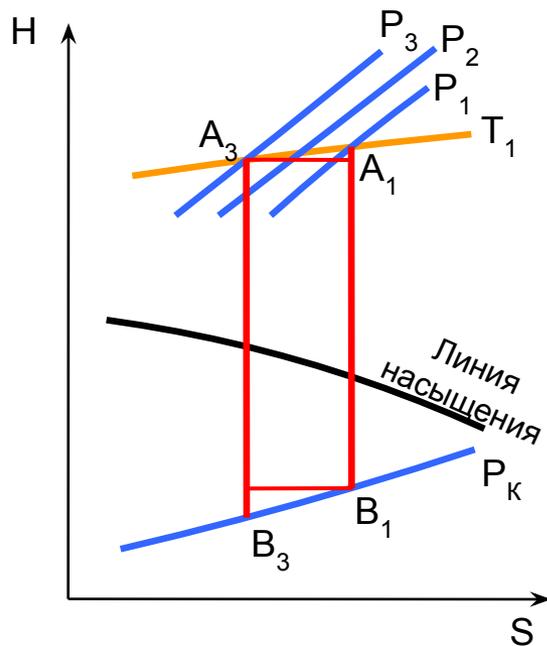
Влияние параметров и промежуточного перегрева пара на эффективность цикла

# Влияние параметров пара на КПД

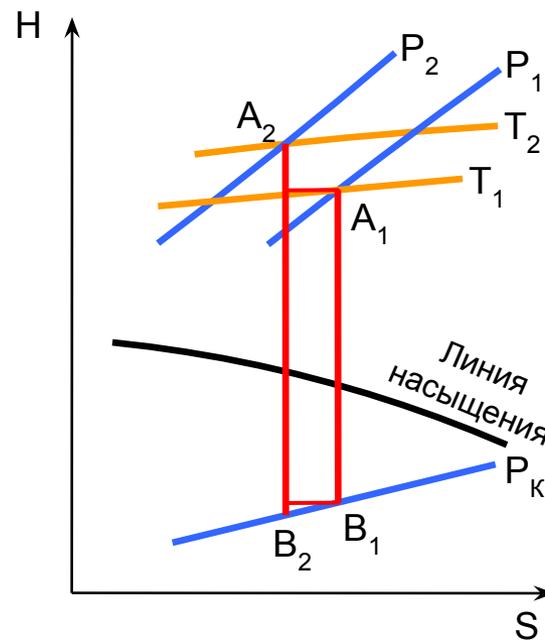
Влияние начальной температуры



Влияние начального давления



Совместное влияние начальных параметров



# Влияние температуры на КПД цикла

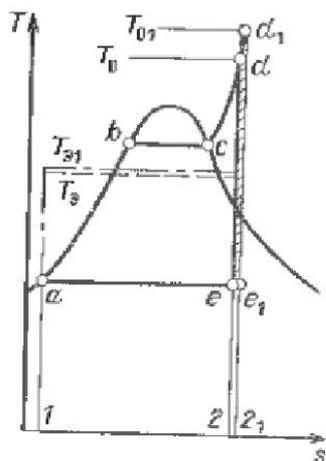
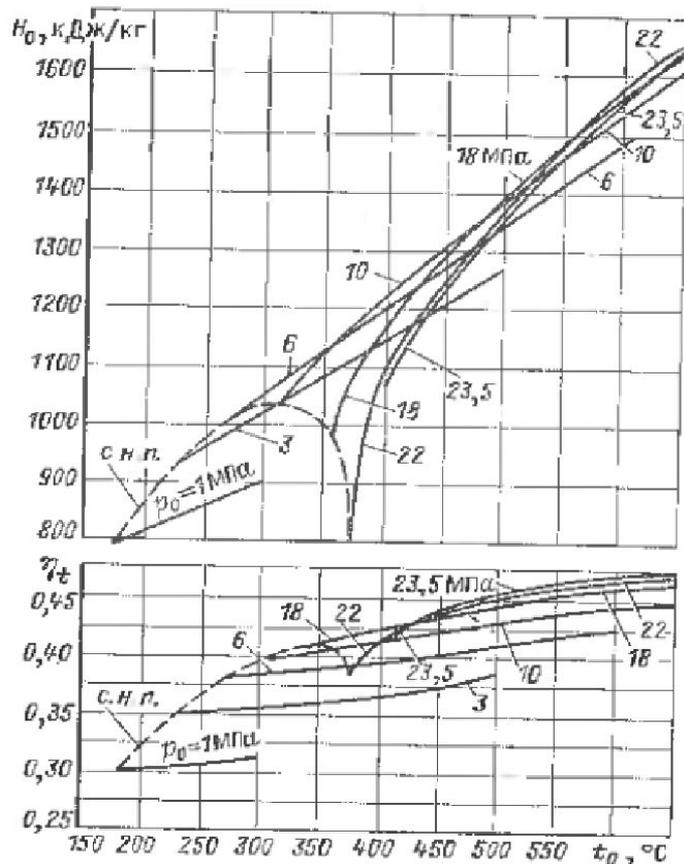


Рис. 110. Сравнение идеальных циклов с разными начальными температурами пара в  $T, s$ -диаграмме

Рис. 111. Влияние начальной температуры пара  $t_0$  на располагаемый теплоперепад  $H_0$  и абсолютный КПД идеального цикла  $\eta$ , (с.н.п. — сухой насыщенный пар)



# Влияние давления на КПД цикла

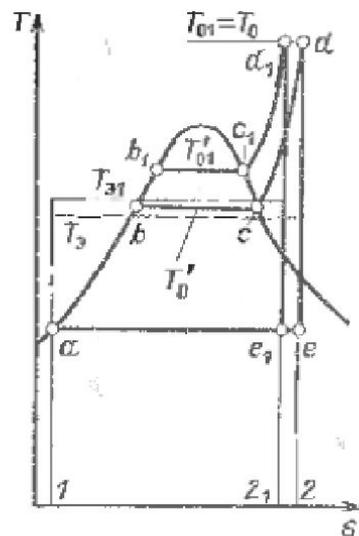


Рис 112 Сравнение идеальных циклов с разными начальными давлениями пара в  $T, s$ -диаграмме

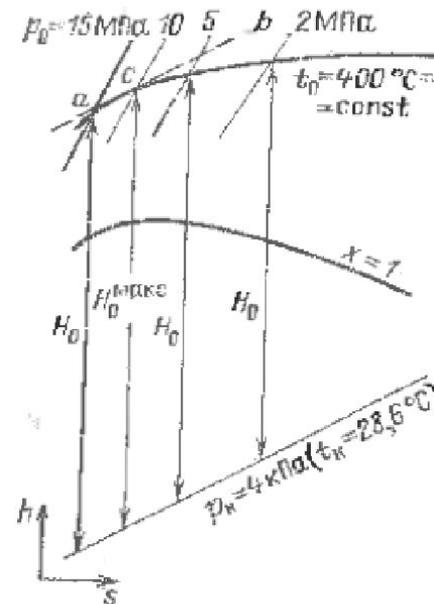
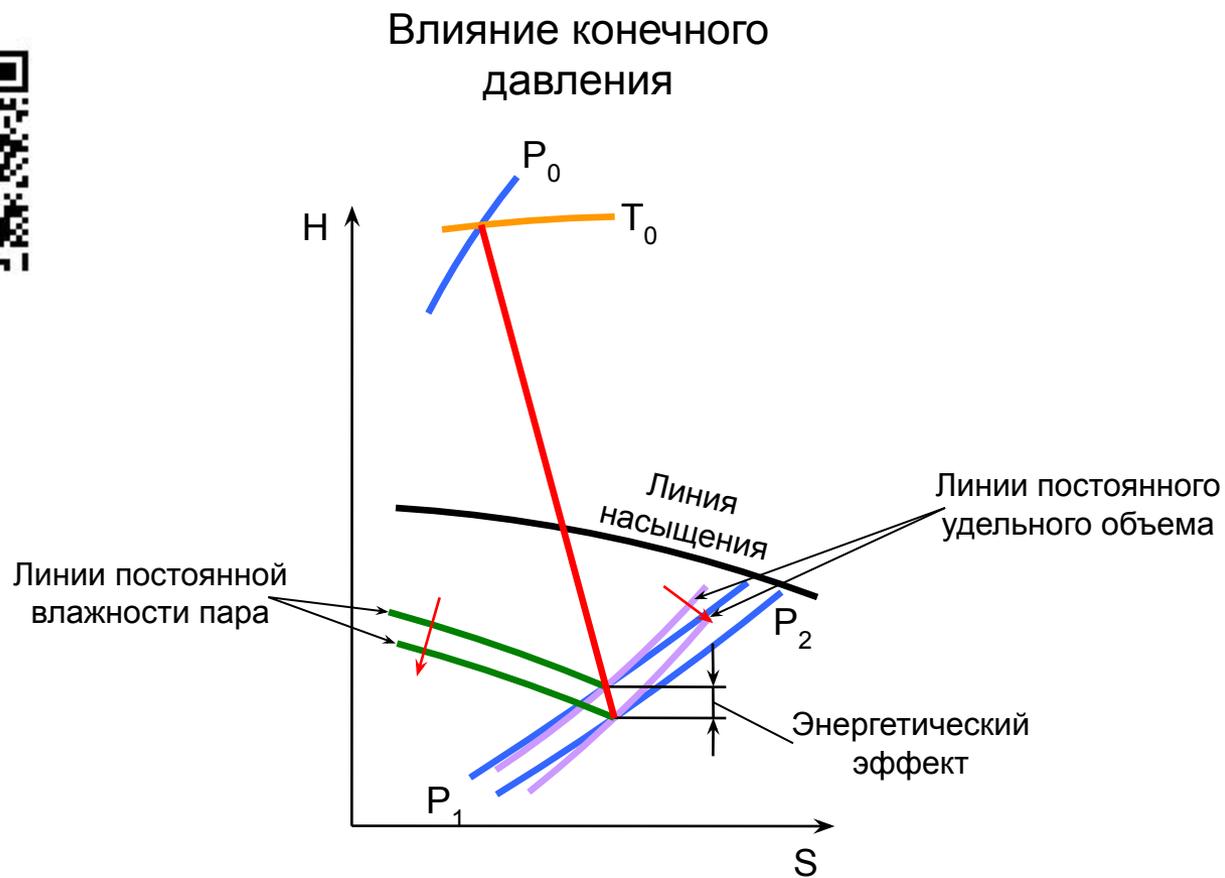
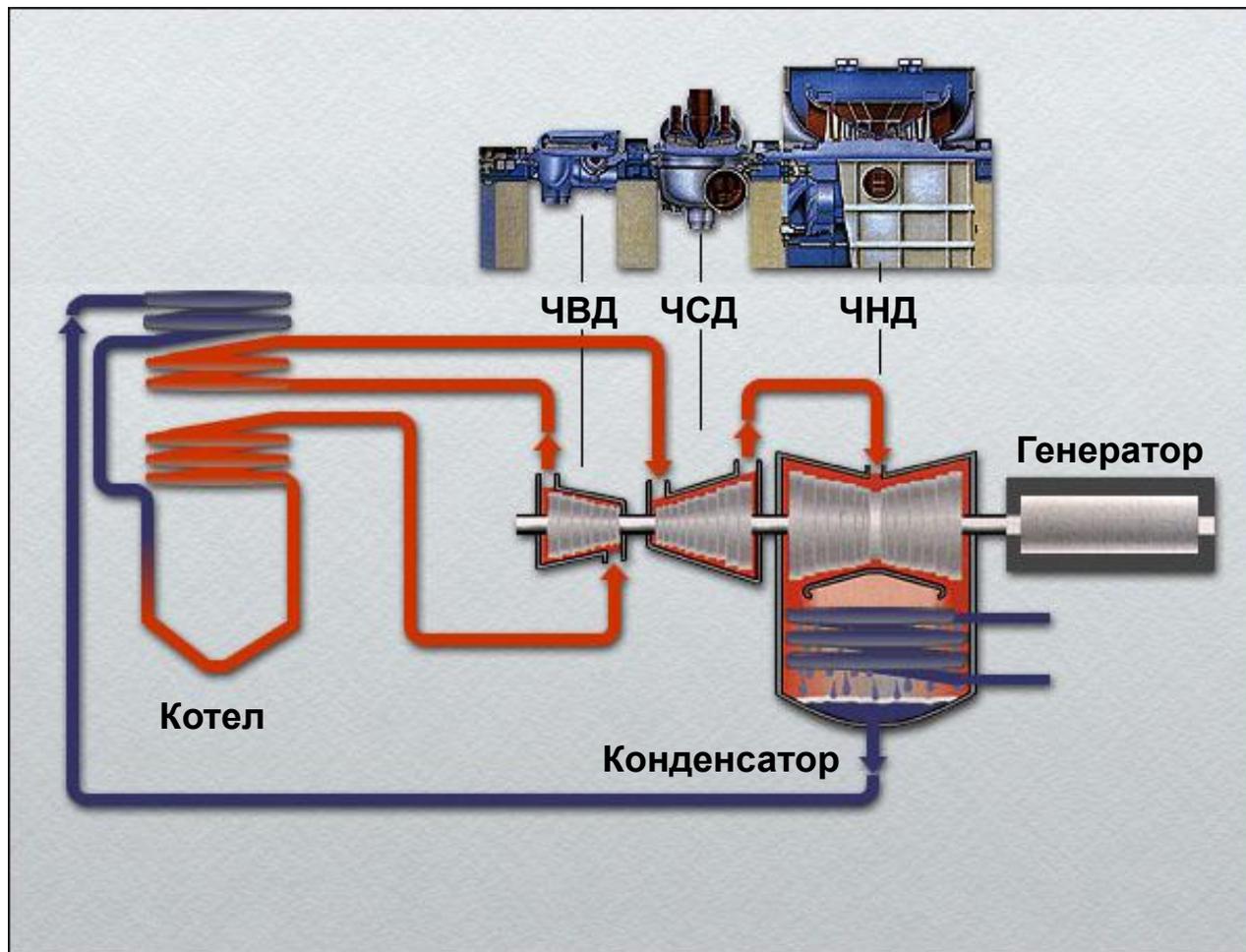


Рис 113 Изменение располагаемого теплоперепада  $H_0$  в зависимости от начального давления  $p_0$  при неизменных начальной температуре  $t_0$  и конечном давлении  $p_k$  ( $ab$  линия, параллельная изобаре  $p_k$  и касательная к изотерме  $t_0$ )

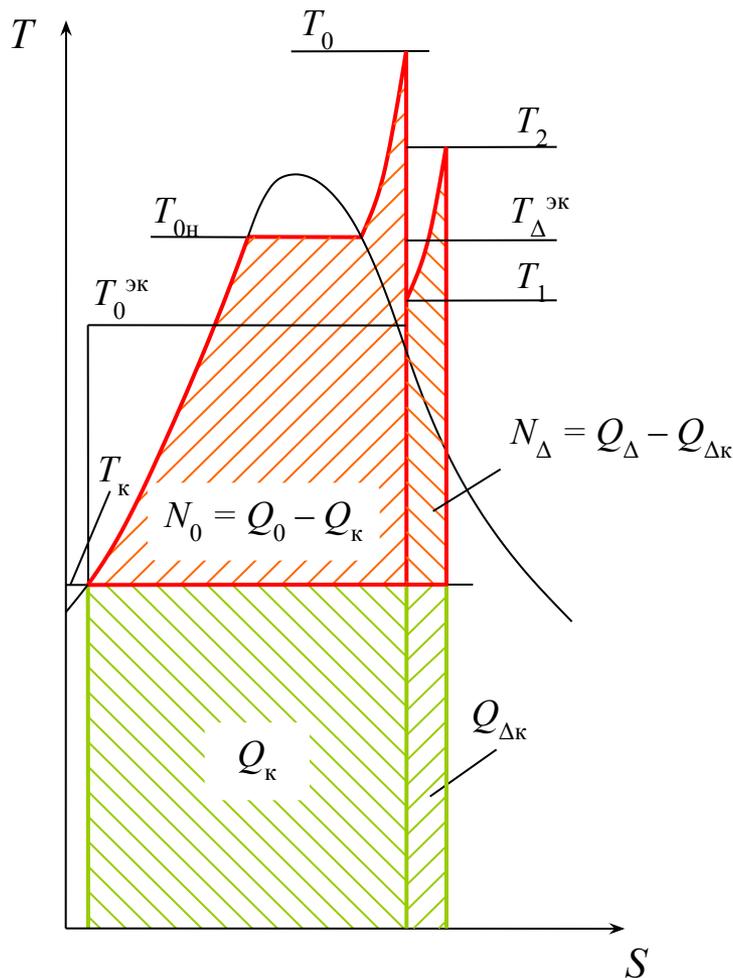
# Влияние параметров пара на КПД



# Цикл Ренкина с промперегревом



# Повышение эффективности за счет промежуточного перегрева



Температура промежуточного перегрева пара выбирается примерно равной начальной температуре свежего пара.

Покажем наличие оптимального давления.

Рассмотрим цикл с промперегревом как сложный цикл, состоящий из исходного цикла и дополнительного цикла. Тогда КПД такого сложного цикла:

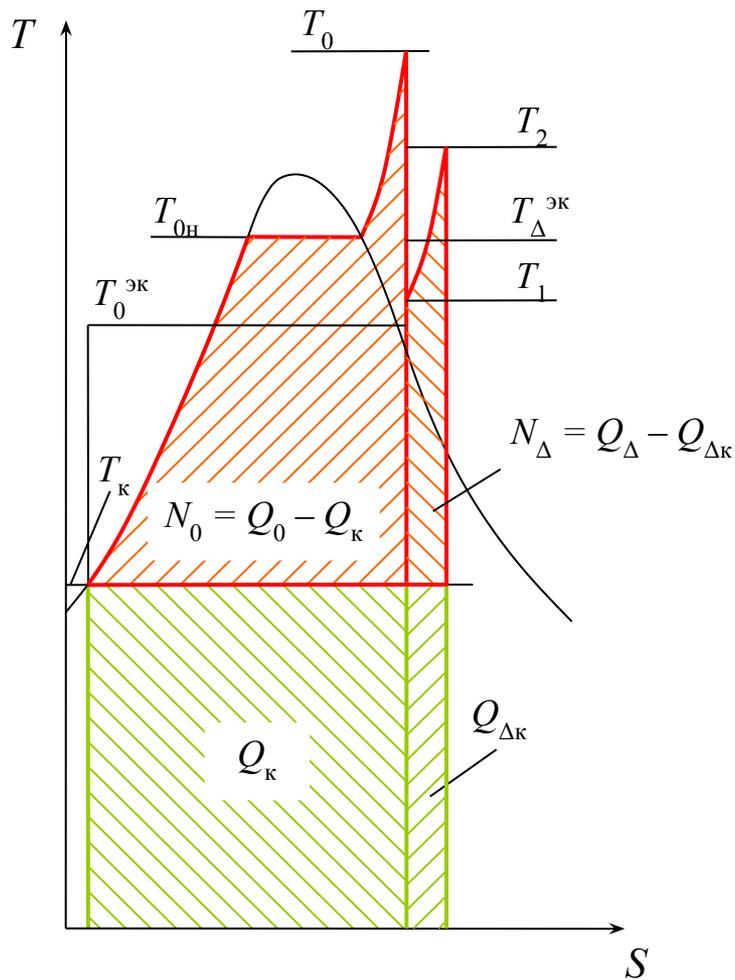
$$\eta_{\text{шт}} = \frac{N_0 + N_\Delta}{Q_0 + Q_\Delta}$$

Введем энергетический коэффициент:

$$A_\Delta = \frac{N_\Delta}{N_0}$$



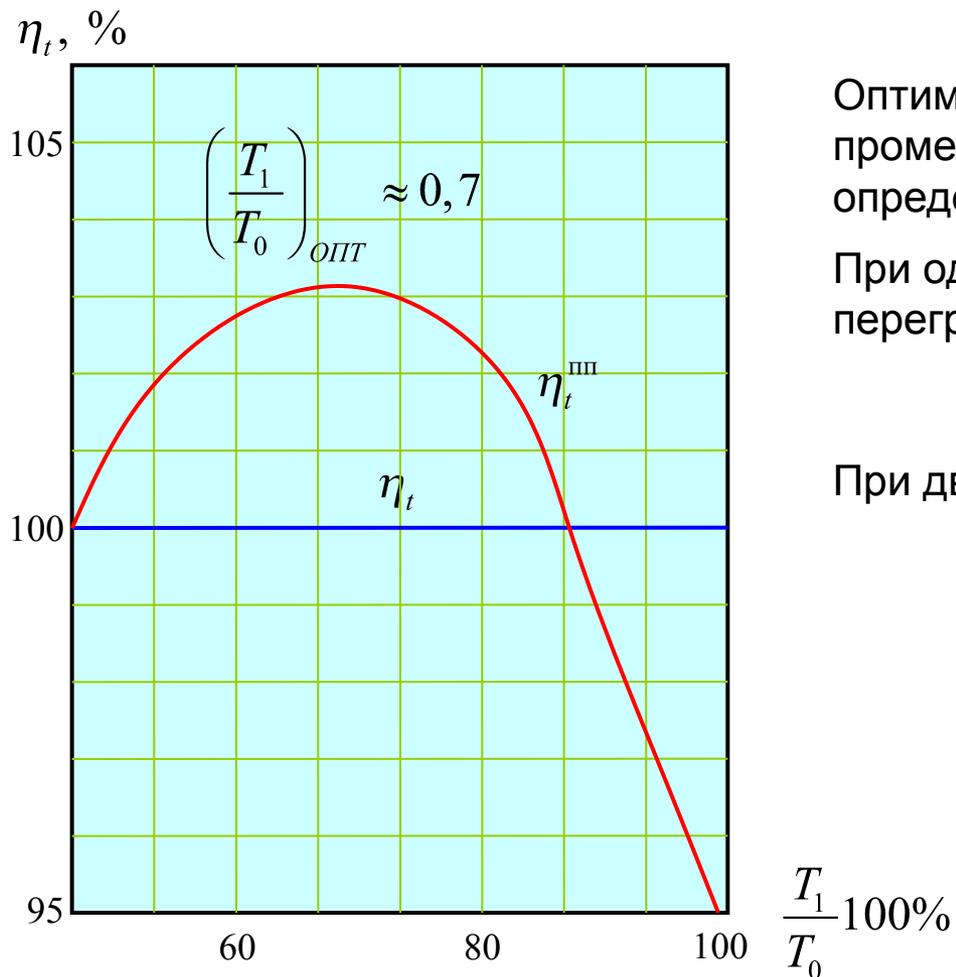
# Повышение эффективности за счет промежуточного перегрева



Относительное изменение КПД из-за промежуточного перегрева равно

$$\Delta\eta_{\text{III}} = \frac{\eta_{\text{III}} - \eta_0}{\eta_0} = \frac{1 - \frac{\eta_0}{\eta_\Delta}}{A_\Delta + \frac{\eta_0}{\eta_\Delta}}$$

# Прирост термического КПД за счет промперегрева



Оптимальное значение давления промежуточного перегрева можно определить вариантными расчетами.

При одноступенчатом промежуточном перегреве

$$p_{\text{пр}} = (0,15 \dots 0,20) p_0$$

При двухступенчатом

$$p_{\text{пр}}^I = (0,25 \dots 0,30) p_0$$

$$p_{\text{пр}}^{II} = (0,25 \dots 0,30) p_{\text{пр}}^I = \\ = (0,06 \dots 0,09) p_0$$

# Цикл Ренкина с промперегревом

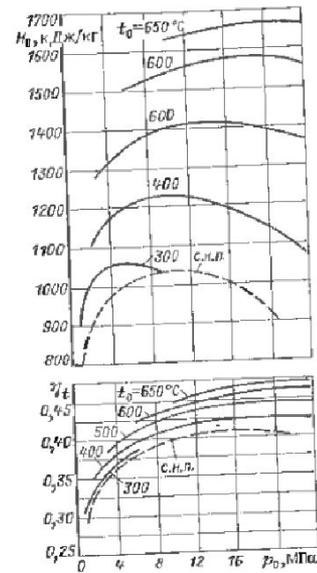


Рис. 1.14

Рис. 1.14 Влияние начального давления  $p_0$  на располагаемый теплоспад  $H_0$  и абсолютный КПД идеального цикла  $\eta_t$  (с.н.п. — сухой насыщенный пар)

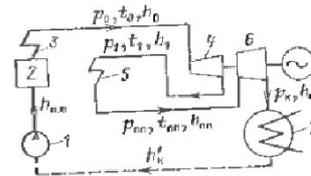


Рис. 1.15

Рис. 1.15 Схема теплоэнергетической установки с промежуточным перегревом пара

1 — питательный насос; 2 — котел; 3 — перегреватель; 4 — часть высокого давления турбины; 5 — промежуточный перегреватель; 6 — часть низкого давления турбины; 7 — конденсатор

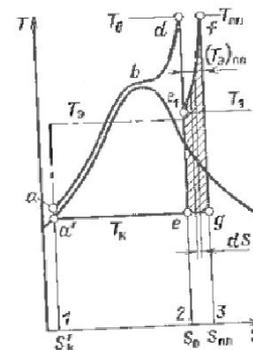
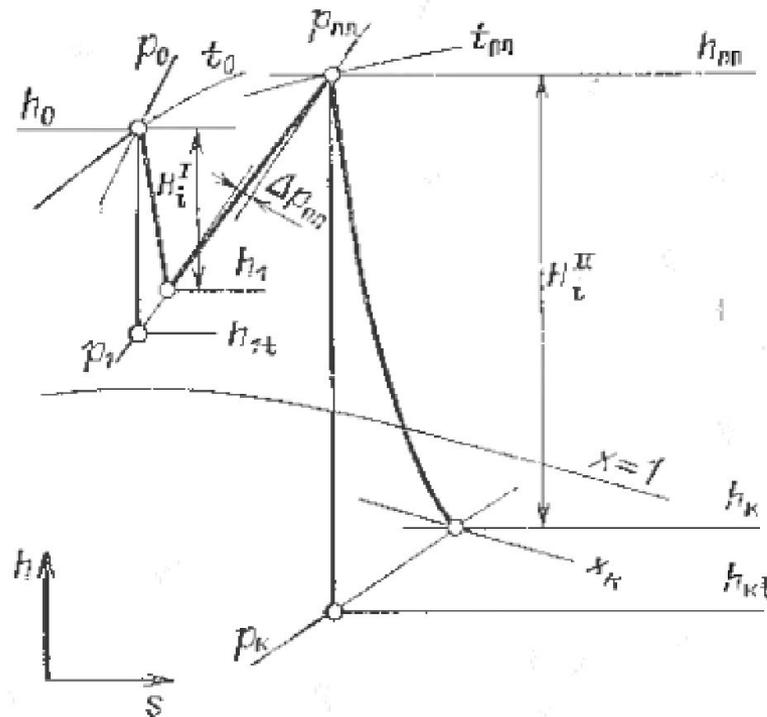


Рис. 1.16

Рис. 1.16 Идеальный тепловой цикл с промежуточным перегревом пара в  $T, s$ -диаграмме

# Процесс расширения пара в турбине с промперегревом



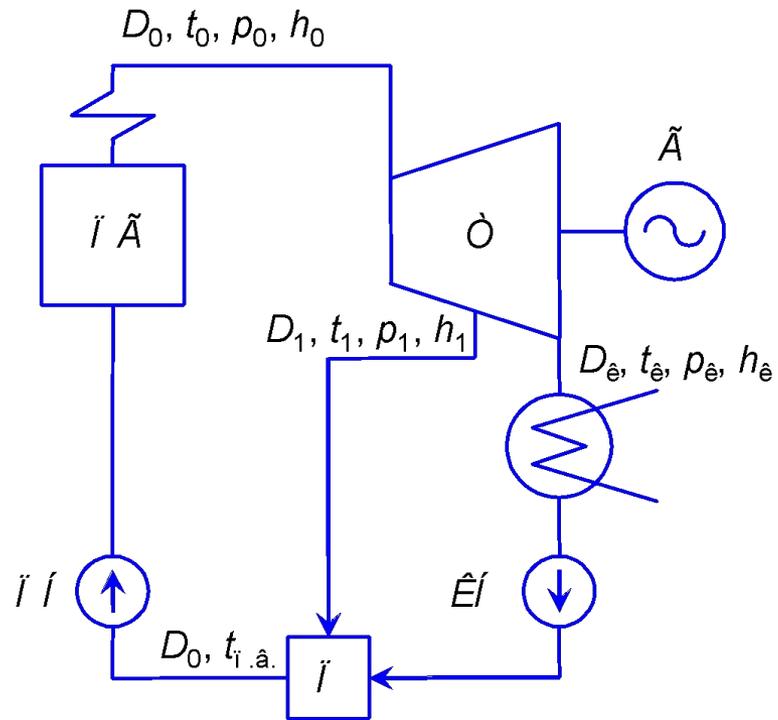
- Формулы по определению полного теплоперепада (и остальные) писать на доске

# Лекция 4

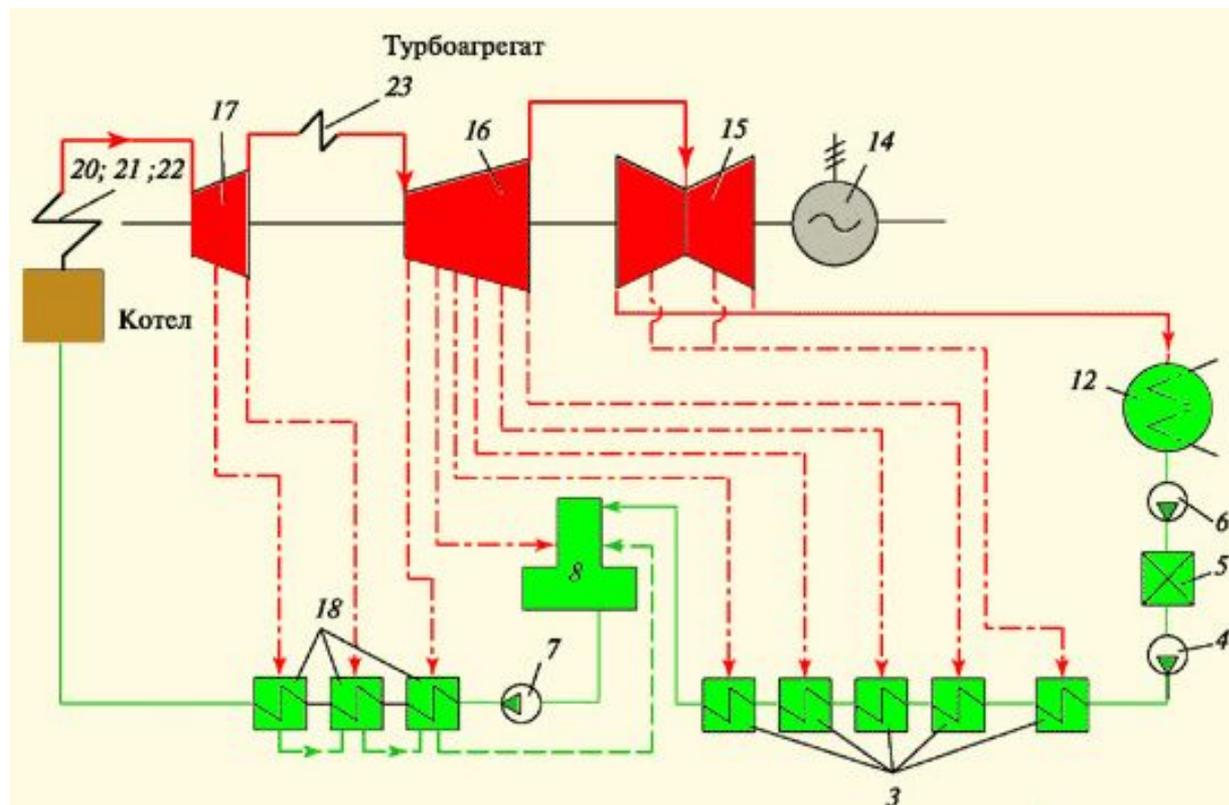
Регенеративный подогрев питательной воды.

Комбинированная выработка тепло- и электроэнергии.

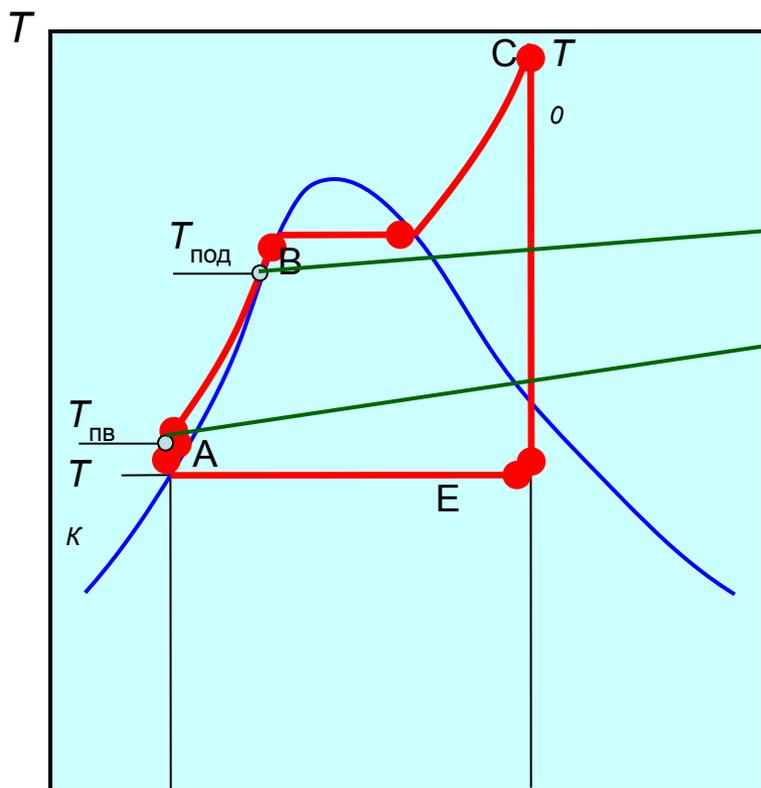
# Основы регенерации



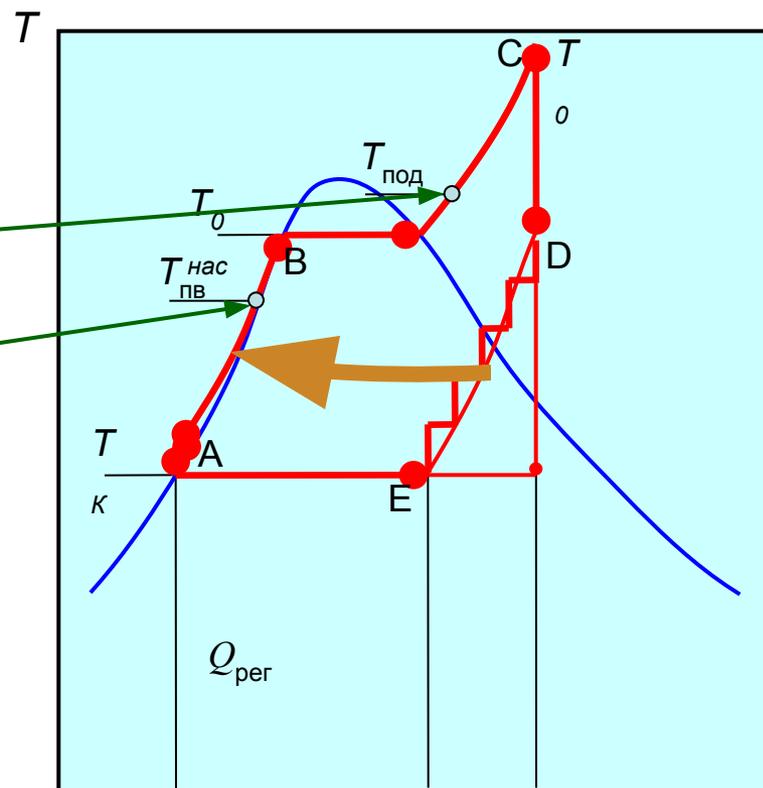
# Основы регенерации



# Термодинамические основы регенерации



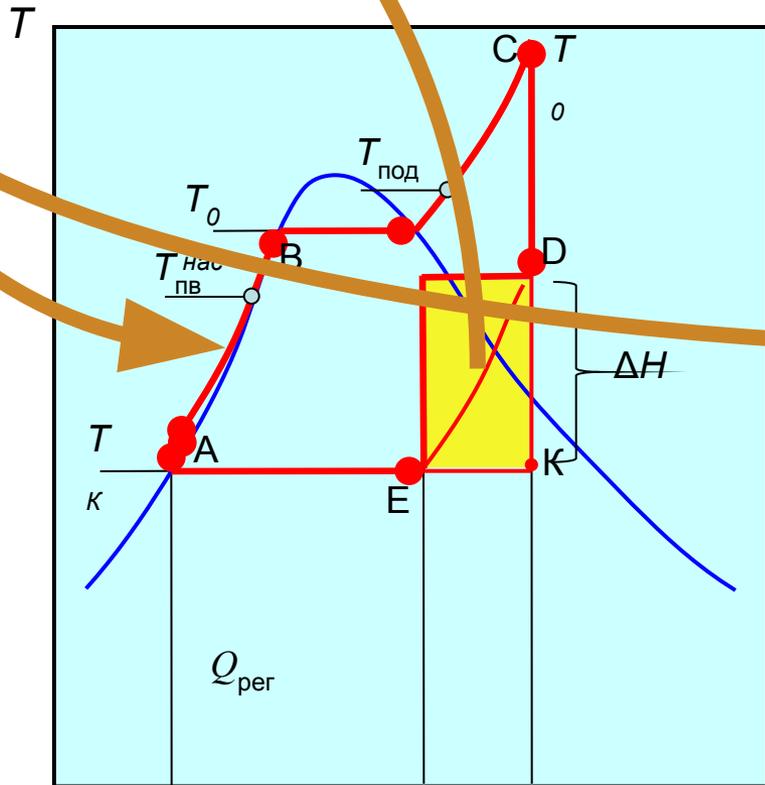
Цикл Ренкина без регенерации



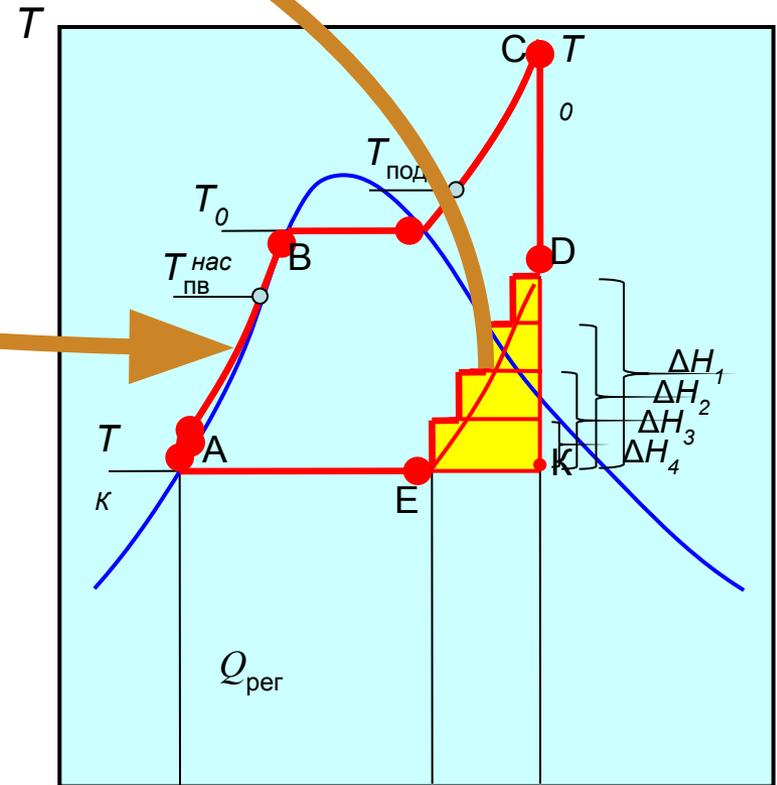
Цикл Ренкина с регенерацией

$$\text{КПД} = 1 - \frac{T_K}{T_{\text{под}}}$$

# Недовыработка тепла



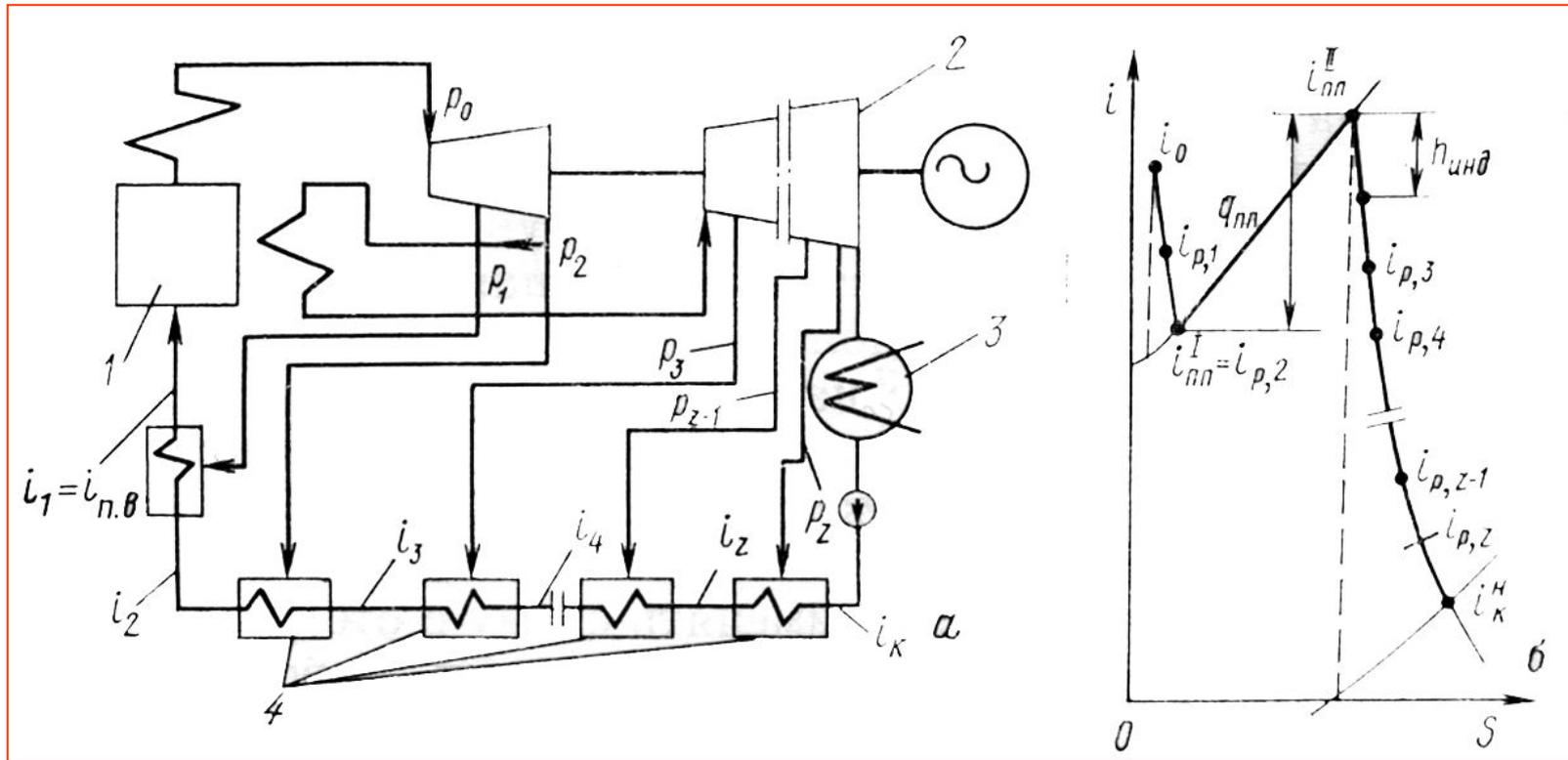
При одноступенчатом подогреве  $s$



При многоступенчатом подогреве  $s$

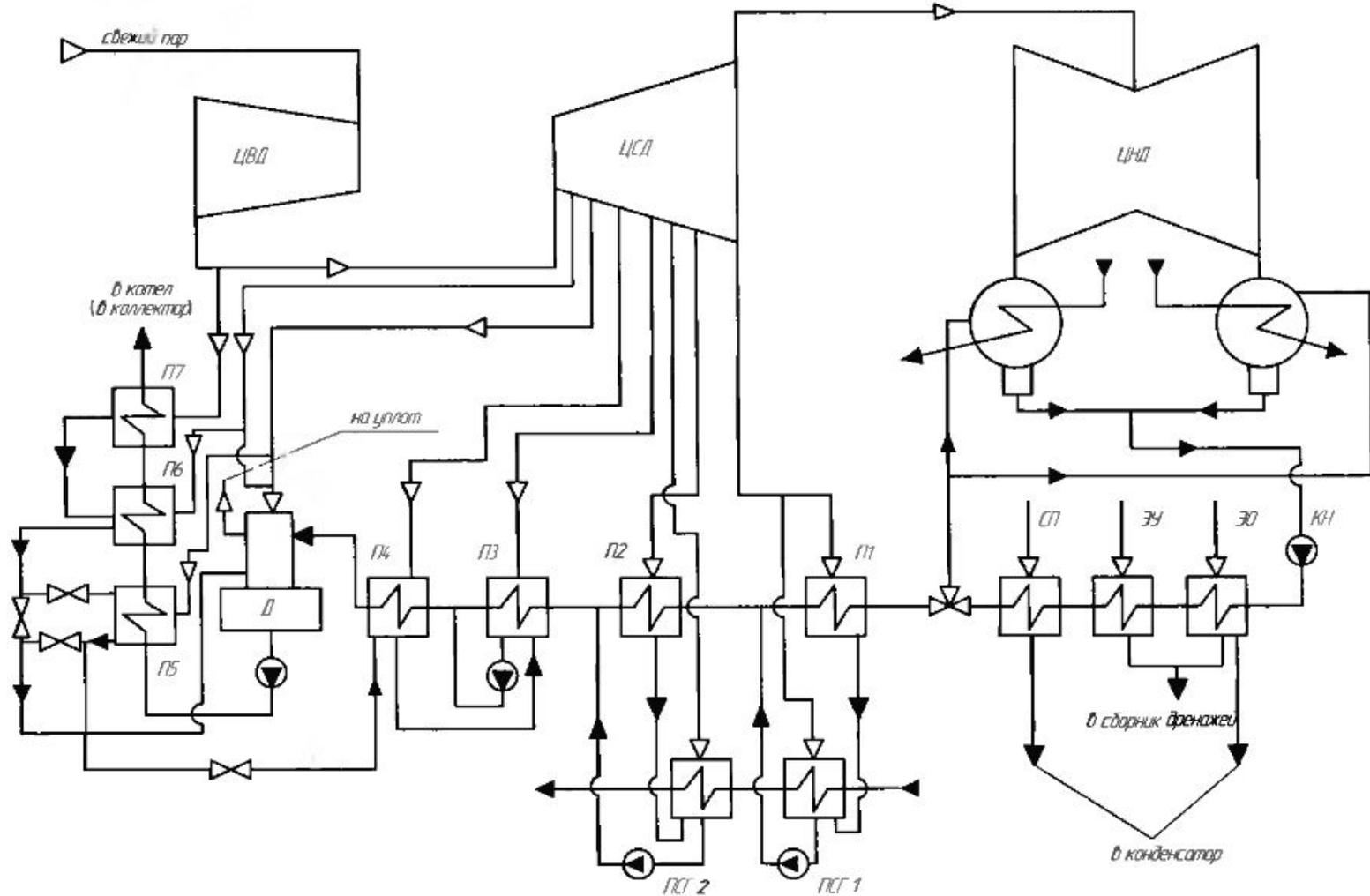
Коэффициент недовыработки  $y_i = \frac{h_K - h_i}{h_K}$ , где  $i=1, 2, 3, 4$

# Ступенчатая система регенерации для энергоблока с промежуточным перегревом



1 – паровой котел; 2 – турбогенератор; 3 – конденсатор; 4 – подогреватель

# Схема регенерации реального энергоблока



# Процесс расширения в турбинах насыщенного пара

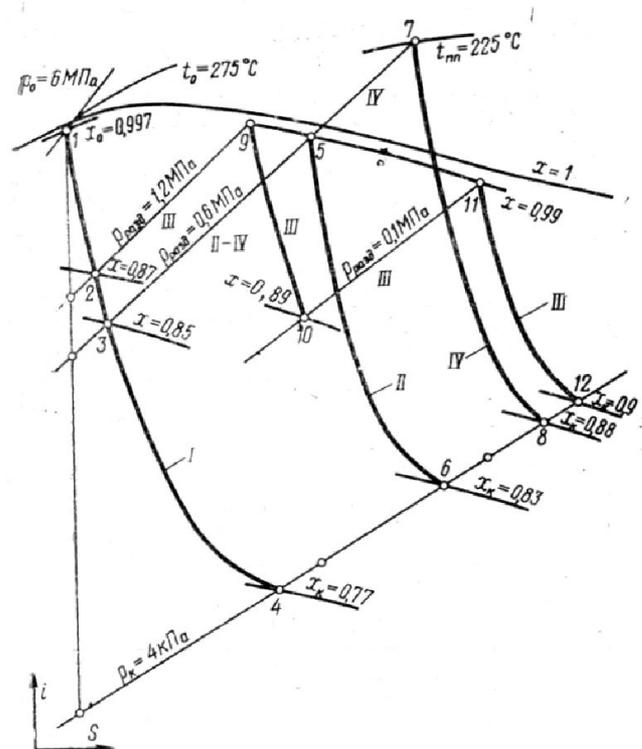


Рис. 1-29. Процесс расширения пара в турбинах насыщенного пара в  $iS$ -диаграмме.

Линия I — в турбине без внешней сепарации и промперегрева; линия II — в турбине с однократной внешней сепарацией; линия III — в турбине с двукратной внешней сепарацией; линия IV — в турбине с однократной внешней сепарацией и промежуточным перегревом пара.

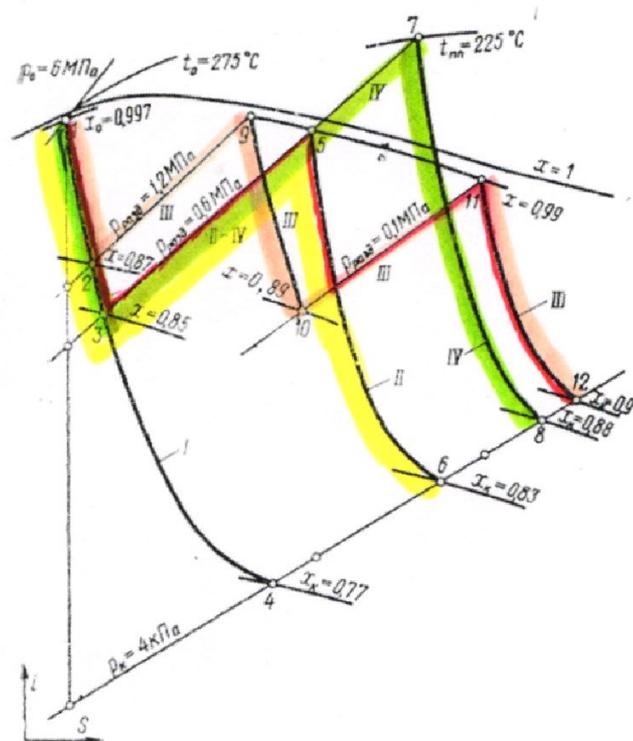


Рис. 1-29. Процесс расширения пара в турбинах насыщенного пара в  $iS$ -диаграмме.

Линия I — в турбине без внешней сепарации и промперегрева; линия II — в турбине с однократной внешней сепарацией; линия III — в турбине с двукратной внешней сепарацией; линия IV — в турбине с однократной внешней сепарацией и промежуточным перегревом пара.

# Раздельная и комбинированная выработка электроэнергии и тепла

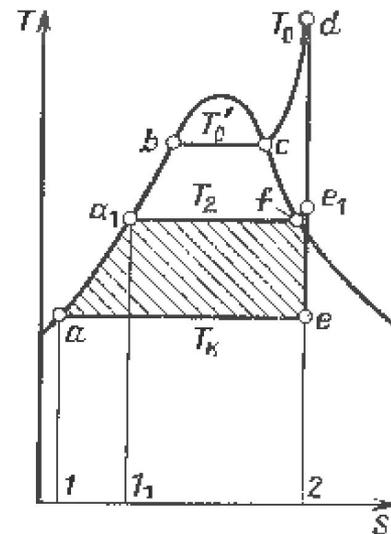
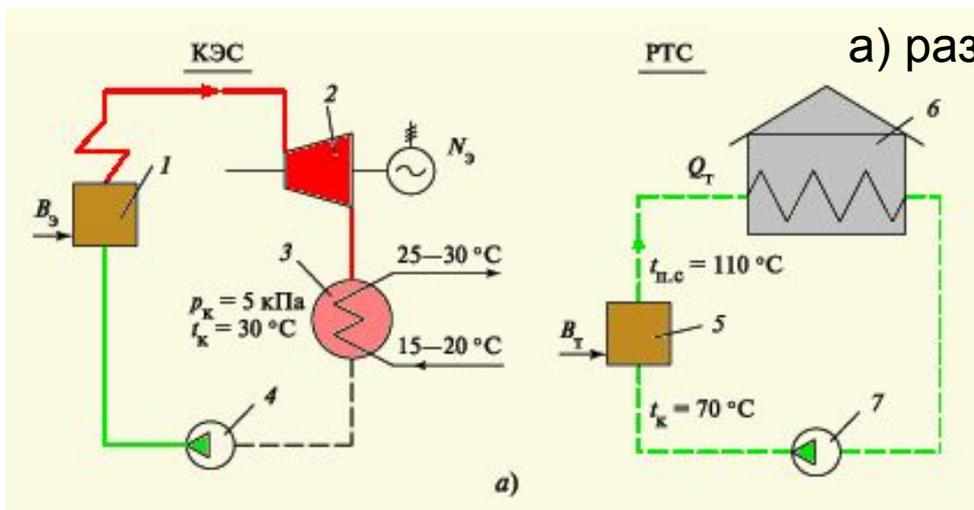
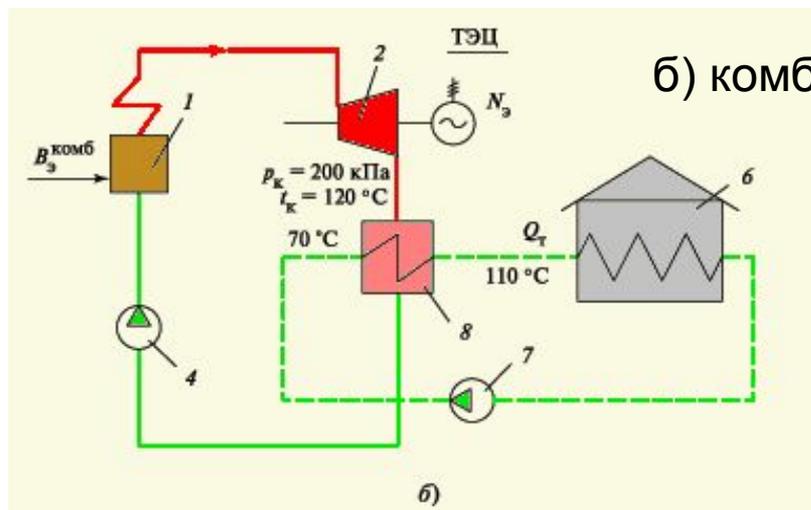


Рис. 1.20 Сравнение идеальных тепловых циклов в  $T, s$ -диаграмме для конденсационной турбины и турбины с противодавлением



1 – энергетический котел; 2 – паровая турбина; 3 – конденсатор; 4 – питательный насос; 5 – водогрейный котел; 6 – потребитель тепла; 7 – сетевой насос; 8 – сетевой подогреватель

# Термодинамическое преимущество комбинированной выработки

Тепло, которое необходимо затратить для производства электроэнергии и теплоты, требуемой потребителю

$$Q_{\text{РАЗД}} = Q_{\text{T}} + \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{К}} \eta_{\text{ПТУ}}}$$



$$Q_{\text{КОМБ}} = Q_{\text{T}} + \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{К}}}$$

Здесь  $\eta_{\text{ПТУ}}=1$ , так как все тепло после турбины направляется в сетевую установку, а не в конденсатор (турбина типа Р)

Экономия тепла от комбинированной выработки

$$\Delta Q = Q_{\text{РАЗД}} - Q_{\text{КОМБ}} = \left( Q_{\text{T}} + \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{К}} \eta_{\text{ПТУ}}} \right) - \left( Q_{\text{T}} + \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{К}}} \right) = \left( \frac{1}{\eta_{\text{ПТУ}}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{К}}} \chi Q_{\text{T}}$$

$\chi = \frac{N_{\text{Э}}}{Q_{\text{T}}}$  характеристика, называемая **выработкой электроэнергии на тепловом потреблении**

Учитывая, что

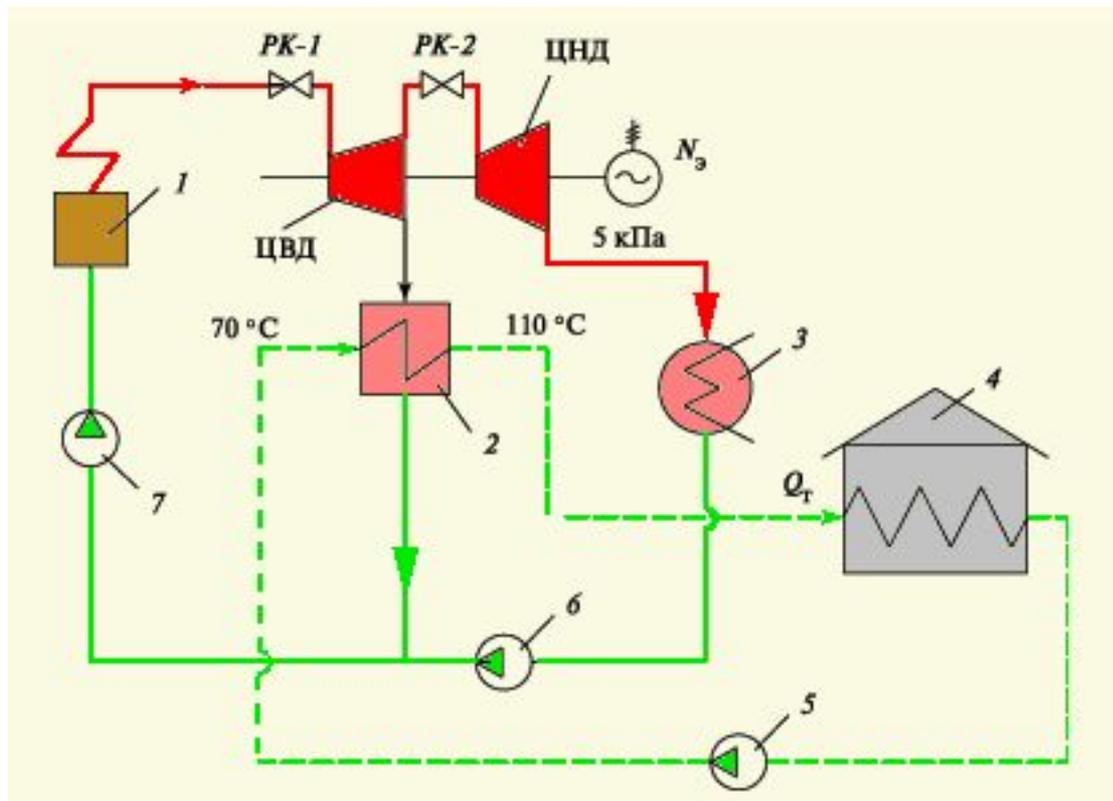
$$\Delta Q = \Delta B Q_{\text{H}}^{\text{P}}$$

Имеем экономию топлива

$$\Delta B = \frac{1}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \left( \frac{1}{\eta_{\text{ПТУ}}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{К}}} \chi Q_{\text{T}}$$

**Данная экономия  
имеется всегда, так  
как  $\eta_{\text{ПТУ}} < 1$**

# Принцип комбинированной выработки с регулируемыми отборами пара

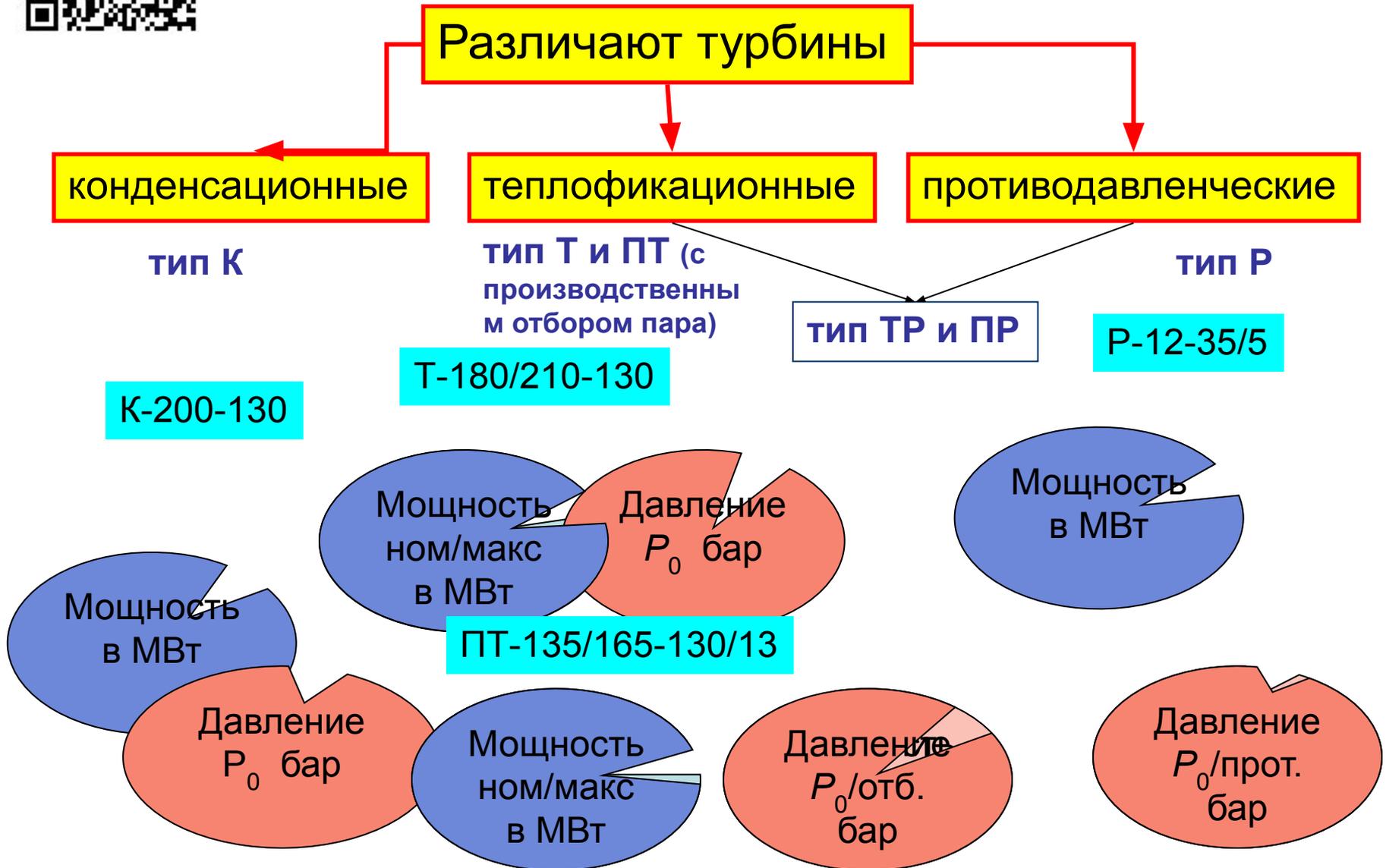


С помощью регулирующих клапанов *РК-1* и *РК-2* соответственно перед ЦВД и ЦНД можно в широких пределах изменять независимо электрическую мощность и отпуск тепла.

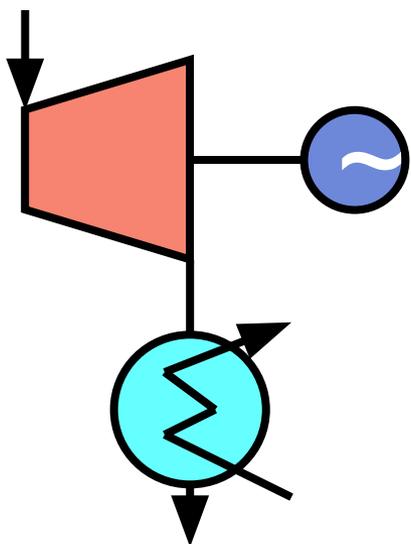
**Регулируемый отбор позволяет иметь как теплофикационную выработку, так и конденсационную. Экономичность работы турбоустановки с теплофикационной турбиной зависит от соотношения расходов пара в сетевой подогреватель и конденсатор: чем оно больше, тем больше экономия топлива.**



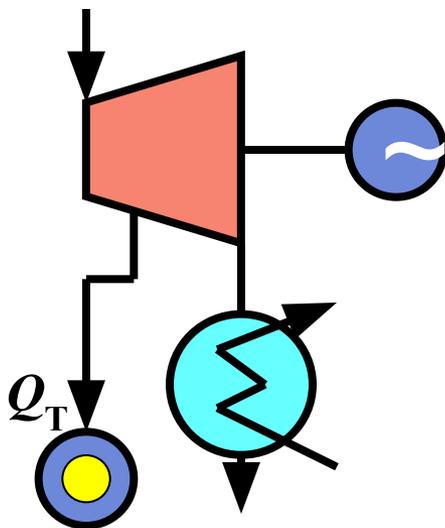
# Классификация паровых турбин



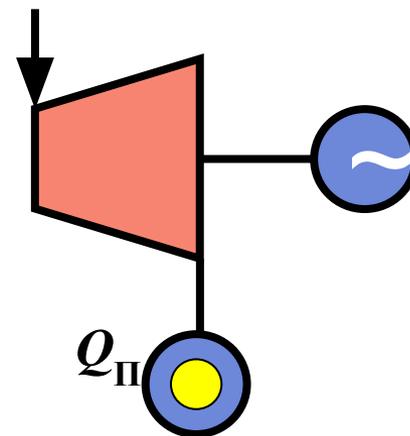
# Классификация паровых турбин



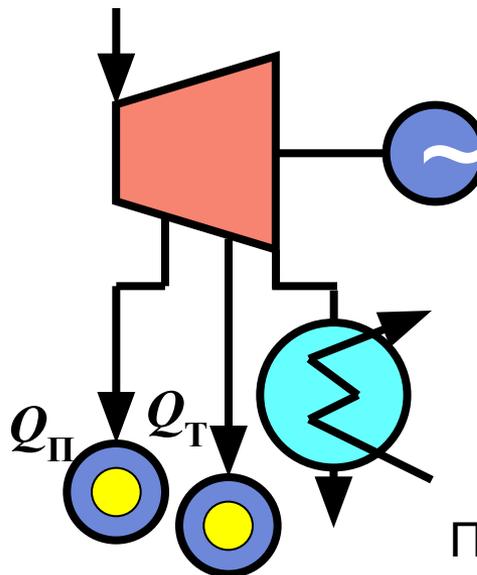
К - турбина



Т - турбина

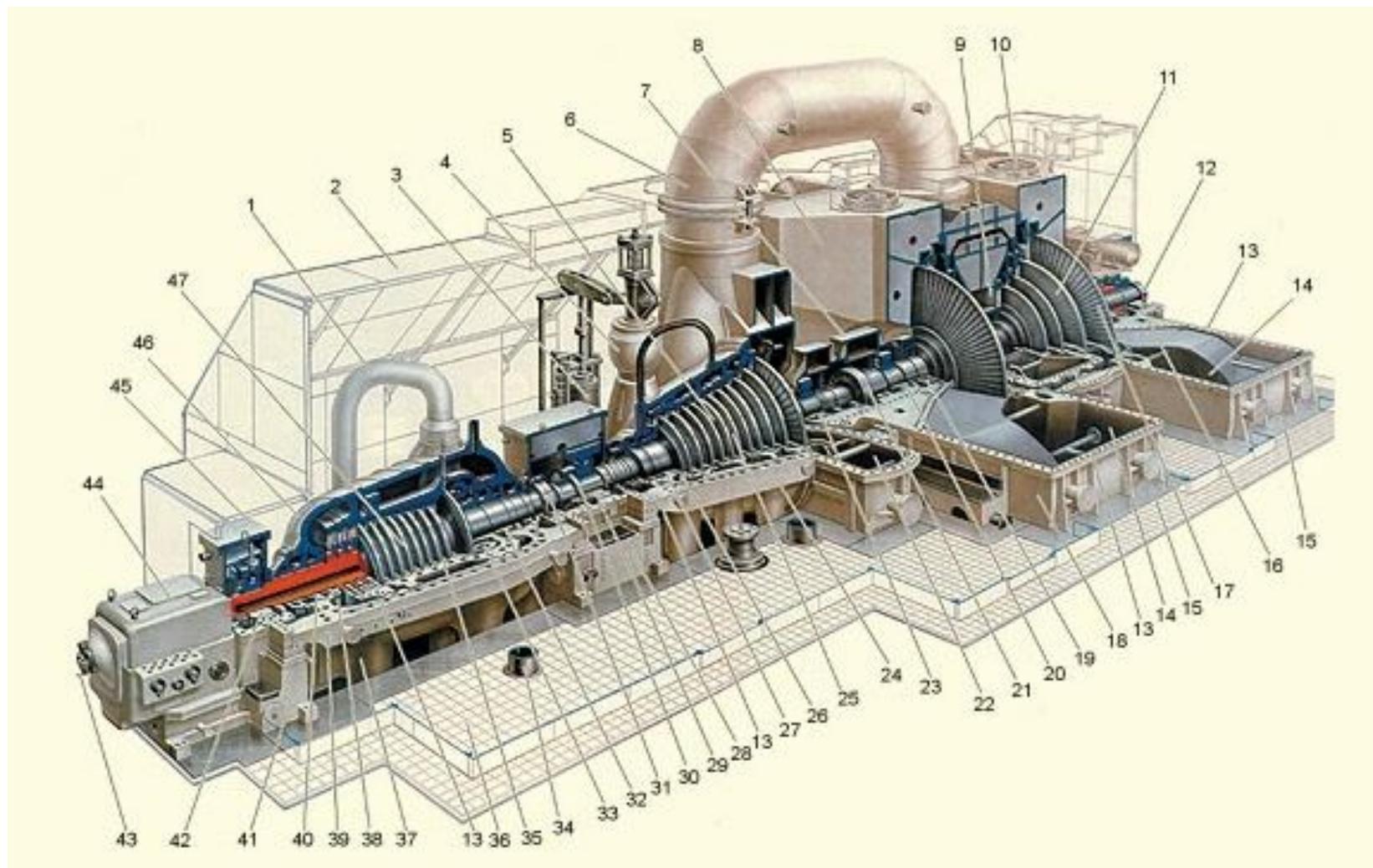


Р - турбина



ПТ - турбина

# Конструкция паровой турбины



## Основные заводы изготовители паровых турбин

- ЛМЗ - Ленинградский металлический завод
- ХТГЗ (ХТЗ) - Харьковский турбогенераторный завод
- УТМЗ (УТЗ, ТМЗ) - Уральский турбомоторный завод
- НЗЛ - Невский завод им.Ленина (в Ленинграде)
- БМЗ - Брянский машиностроительный завод
- КТЗ - Калужский турбинный завод

Конец