

Создание энергоблоков на ультра-
сверхкритические параметры пара

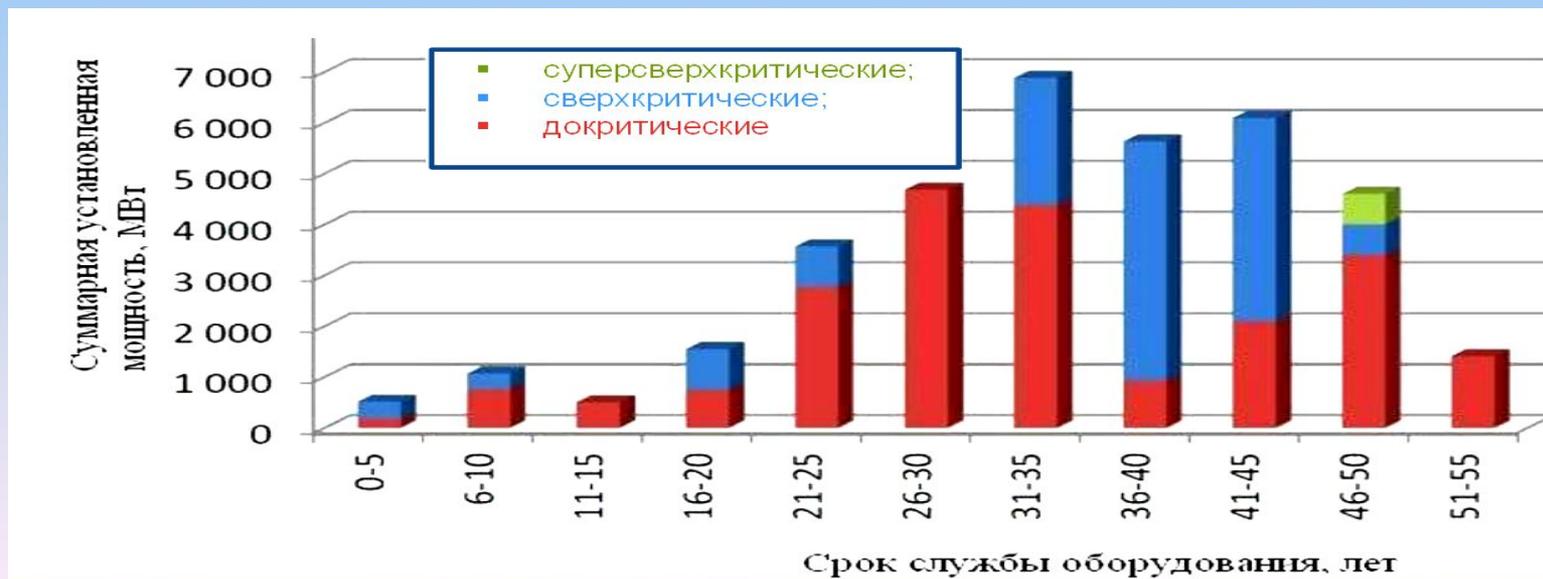
По состоянию на 2014 г. в России находятся в эксплуатации 116 угольных ТЭС, количество установленных наиболее крупных блоков представлено в табл. 1.1 [2].

Таблица 1.1 – Количество установленных наиболее крупных энергоблоков

Большинство из них проработало 35-40 лет и имеет невысокие показатели надежности и эффективности (электрический КПД блоков -30-36%), низкий уровень автоматизации, высокие выбросы NO_x , SO_2 , твердых частиц, на многих станциях существуют проблемы с золоотвалами.

№ п/п	Установленная электрическая мощность блока, МВт	Количество
1	800	2
2	500	7
3	300	28
4	200	35
5	150	28

По данным Международного энергетического агентства (МЭА) почти 70% угольных ТЭС России функционирует на докритических параметрах пара



Стратегические задачи:

- разработка современных энергоэффективных экологически чистых технологий;
- создание промышленного производства энергооборудования нового поколения;
- повышение эффективности тепловых электростанций путем вывода из эксплуатации старого низкоэкономичного оборудования и замена его перспективным, обеспечивающим:
- радикальное снижение затрат на производство электроэнергии и тепла;
- снижение расхода топлива и штатного коэффициента;
- уменьшение выбросов в окружающую среду;
- у

Дорожные карты угольных технологий в российской энергетике



Мероприятия по повышению экономичности паросиловых энергоблоков и степень их влияния

Мероприятие	Относительное повышение КПД
Повышение температуры свежего пара	0,02%/1 °С
Повышение давления свежего пара	0,1%/ 1 МПа
Повышение температуры промежуточного перегрева	0,15%/1 °С
Использование второго промежуточного перегрева пара	1,2%
Снижение давления в конденсаторе	1%/ 1 кПа
Повышение температуры питательной воды	0,02%/1 °С

По расчётным оценкам фирмы Siemens, переход от энергоблоков докритических параметров пара 167 бар, 538/538 °С к энергоблокам СКД с параметрами пара 250 бар, 540/540 °С даёт повышение коэффициента полезного действия (КПД) нетто на 1.5%; дальнейшее повышение параметров до 270 бар, 580/600 °С обеспечивает повышение КПД ещё на 1.3%, и последующий переход на параметры пара 285 бар, 600/620 °С сулит прибавку КПД ещё на 0.6%.

Сопоставление экономичности энергоблоков докритического и сверхкритического давления

Тип блока	Докритического давления	СКД	
		242	251
Давление свежего пара, бар	< 200	242	251
Температуры свежего и вторично перегретого пара, °С	538 / 566	538 / 566	600 / 610
Проектная мощность блока нетто/брутто, МВт	665 / 700	946 / 1000	998.5 / 1050
КПД нетто/брутто, %	37.0 / 39.0	39.9 / 42.1	41.4 / 43.6

Технико-экономические показатели разных типов ТЭС

Параметры	Тип станции/топливо/паровой цикл/параметры пара			
	уголь	уголь	уголь	уголь
	Докритический	Типовой суперкритический	Ультрасуперкритический	Ультрасуперкритический (AD700)
	180 бар 540 °С 540 °С	250 бар 560 °С 560 °С	300 бар 600 °С 620 °С	350 бар 700 °С 700 °С
Номинальная мощность, МВт	500	500	500	500
Собственные нужды, МВт	42	42	44	43
Мощность на выходе, МВт	458	458	456	457
Номинальный КПД брутто, %	43,9	45,9	47,6	49,9
КПД нетто, %	40,2	42,0	43,4	45,6
Эмиссии углерода, т/ч	381	364	352	335
Удельные эмиссии, т/МВт·ч	0,83	0,80	0,77	0,73

Главным стимулом для перехода к сверхкритическим и суперсверхкритическим параметрам пара явилось удорожание угольного топлива и новые требования к снижению выбросов токсичных (NO_x и SO_2) и парниковых (CO_2) газов в атмосферу. Повышение КПД энергоблоков снижает расход топлива при выработке того же количества электроэнергии, а следовательно, уменьшает количество выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания.

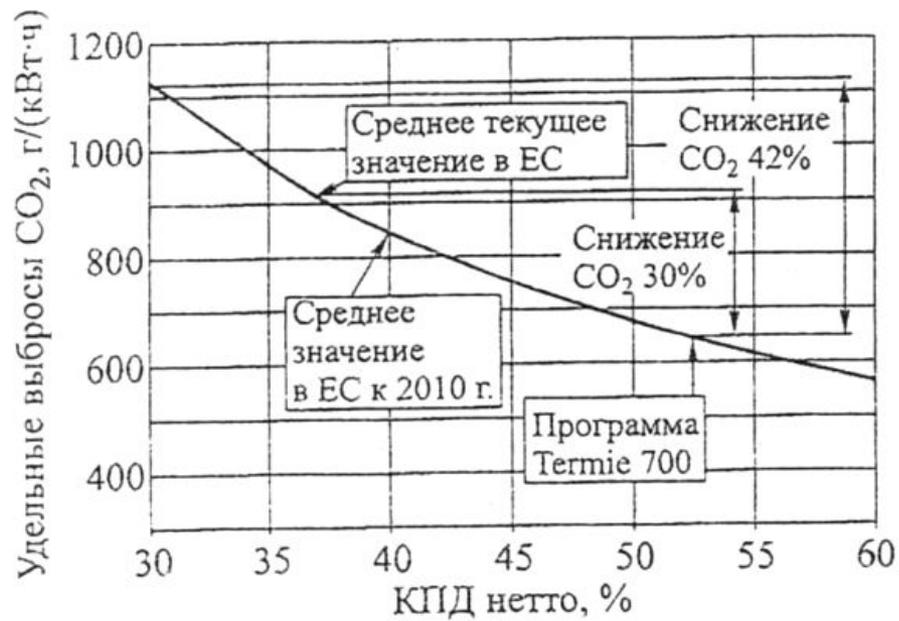
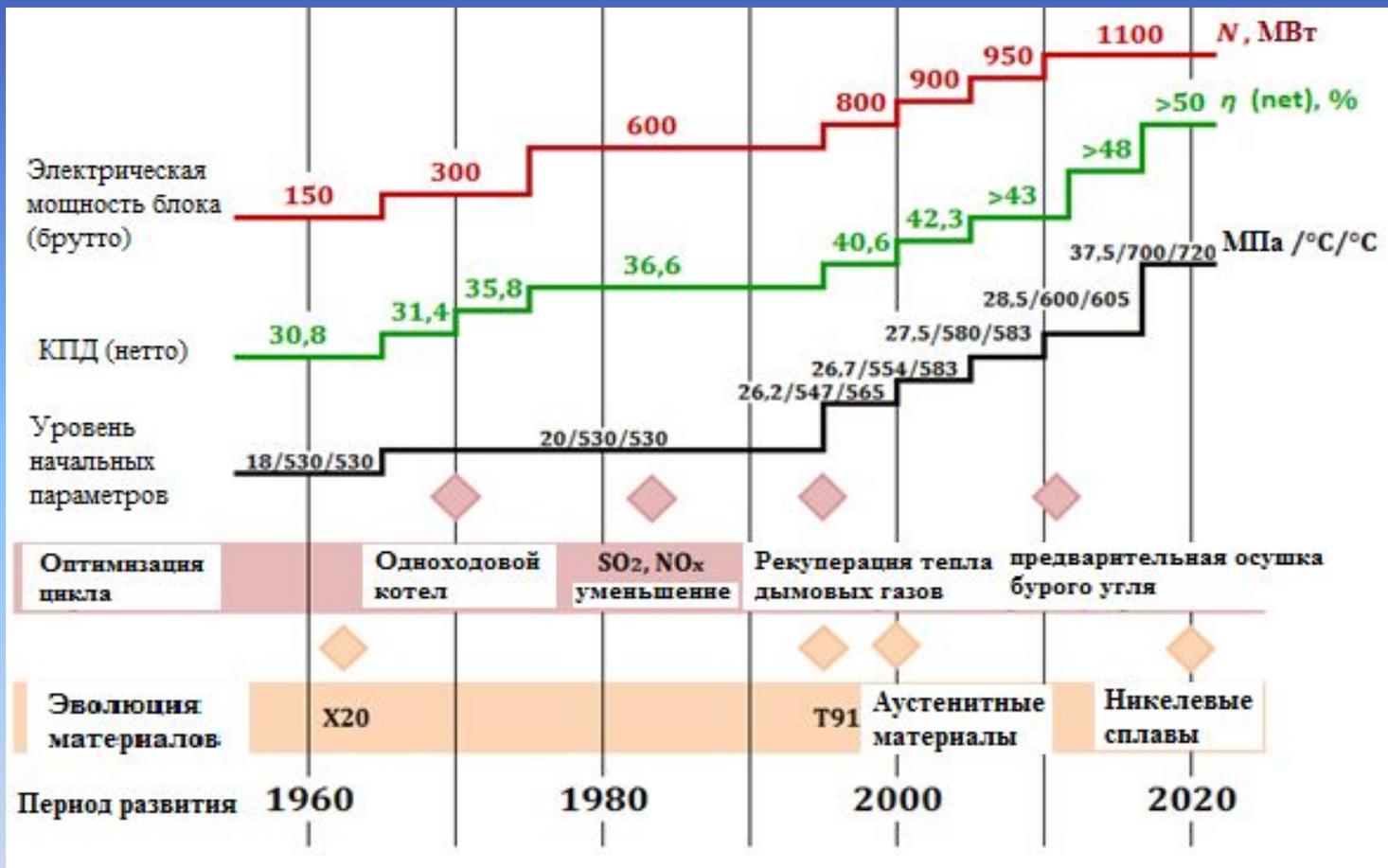
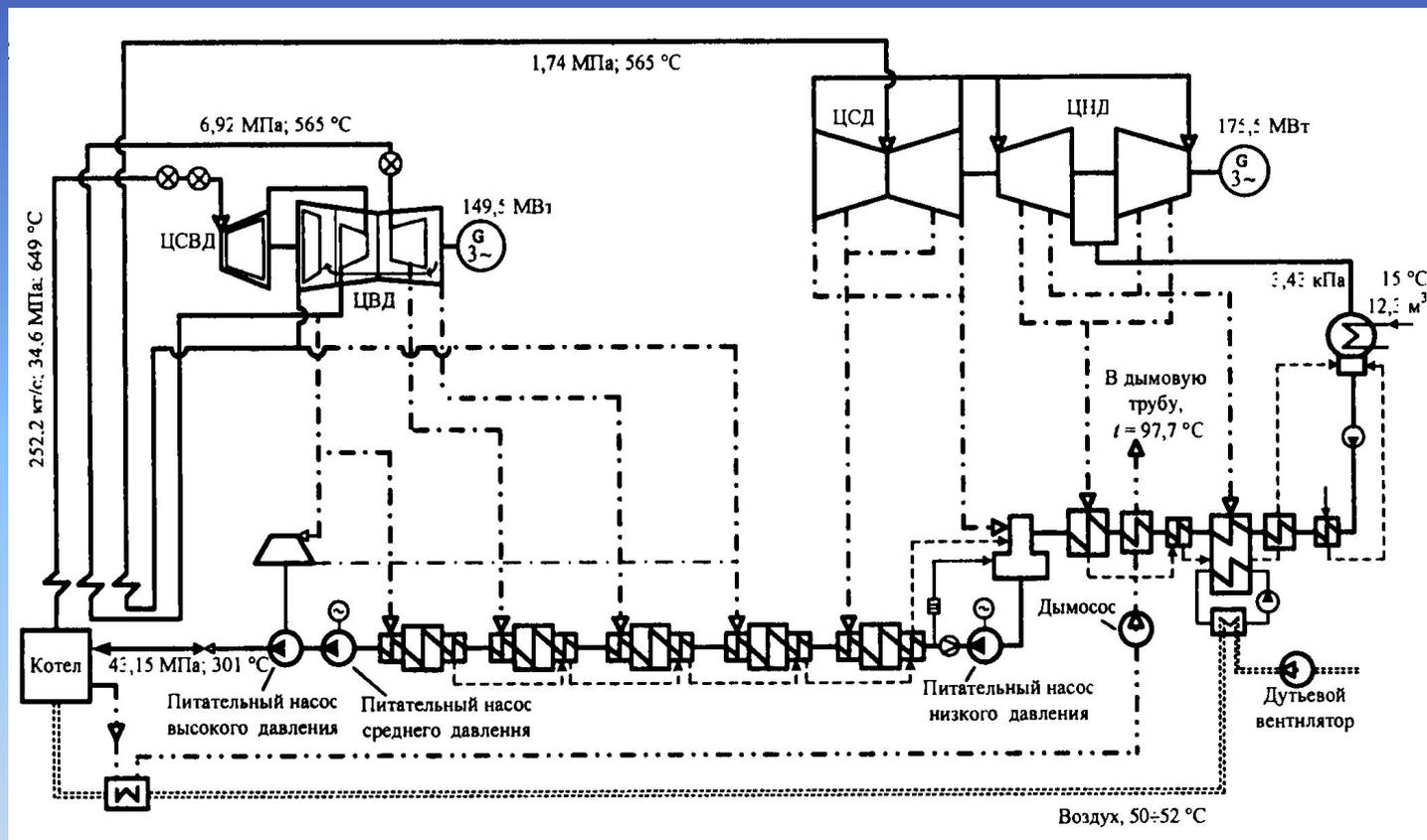


График зависимости удельных выбросов CO₂ от КПД нетто блока



Эволюция параметров паросиловых электростанций

Принципиальная тепловая схема первого энергоблока суперкритических параметров Эддистоун (США) 1959 г.



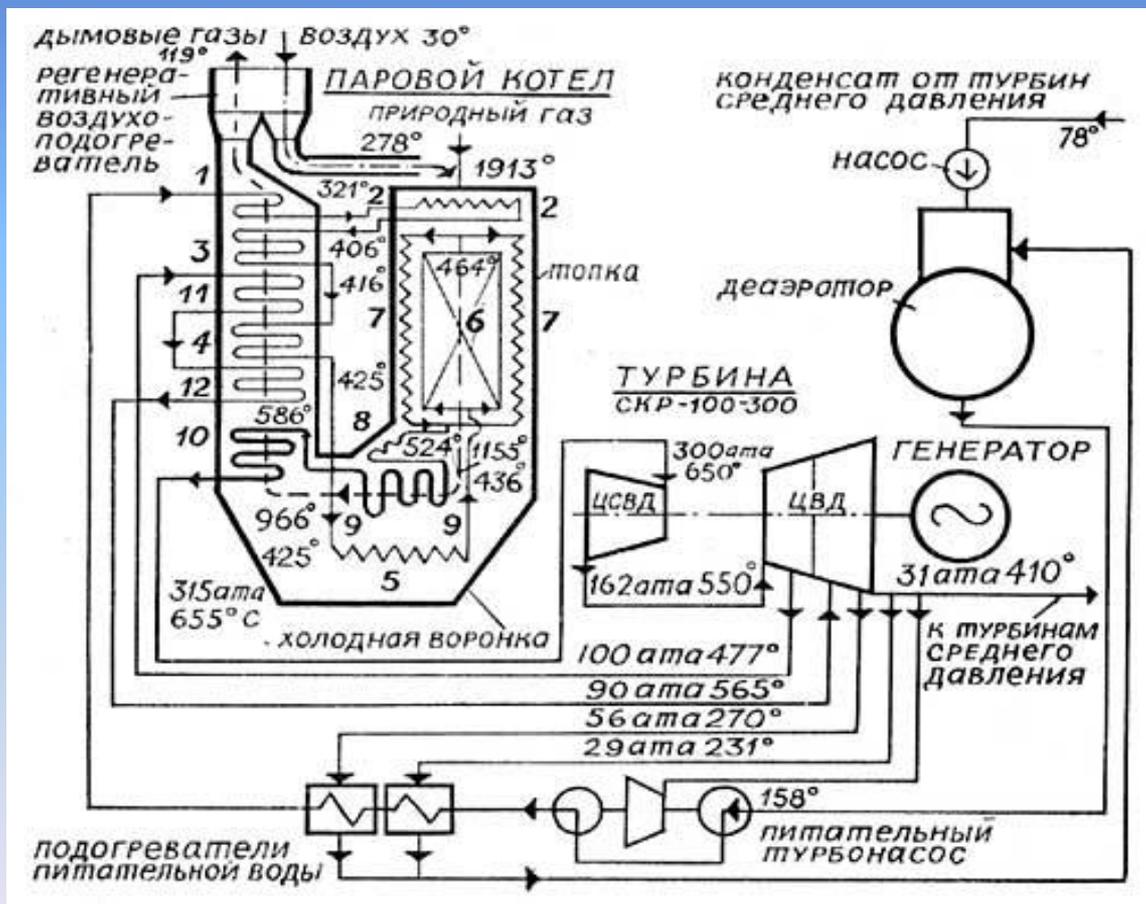
Мощностью 325 МВт при расходе пара 252,2 кг/с.

Параметры свежего пара : $p_0 = 34,62$ МПа (353 ата); $t_0 = 649$ °C.

Двукратный промежуточный перегрев до $t_{пп1} = 565$ °C ($P_{п.п1} = 6,92$ МПа) и $t_{пп2} = 565$ °C ($P_{п.п1} = 1,74$ МПа) [35].

Турбоустановка состоит из двух турбин мощностью 149,5 и 175,5 МВт. С выхлопа первой турбины пар с давлением 1,74 МПа поступает на второй промежуточный перегрев и затем во вторую турбину.

В 1966 г. на Каширской ГРЭС началась опытно-промышленная эксплуатация паровой турбины СКР-100-300, построенной ХТЗ на начальные параметры 29,4 МПа, 650 °С с противодавлением 3,03 МПа. В течение ряда лет отечественная теплоэнергетика получала уникальный опыт работы на ССКП.

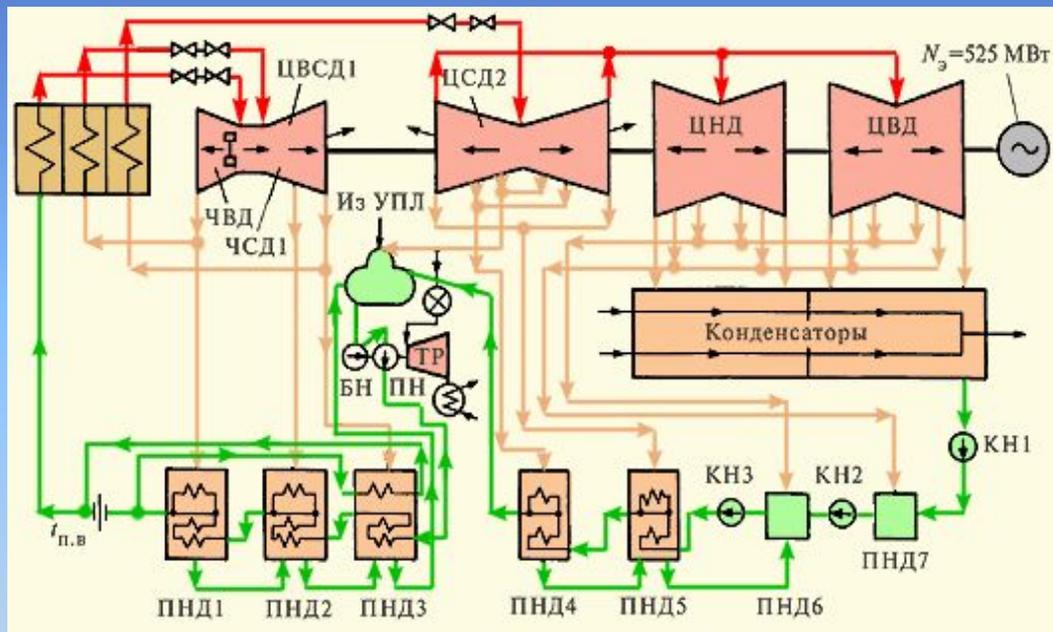


Наработка энергоблока СКР-100 с котлом П-37 паропроизводительностью 720 т/ч с параметрами острого пара 30 МПа и 650 С, эксплуатировавшегося на Каширской ГРЭС до 1986 г., составила 42000 ч (после выработки ресурса турбиной среднего давления эксплуатация энергоблока не возобновлялась).

Тепловая схема энергоблока Каширской ГРЭС на базе турбина СКР-100-300

Результаты расчета энергоблока с однократным промперегревом

	580/580	580/600	600/600
	44,94	45,11	45,33



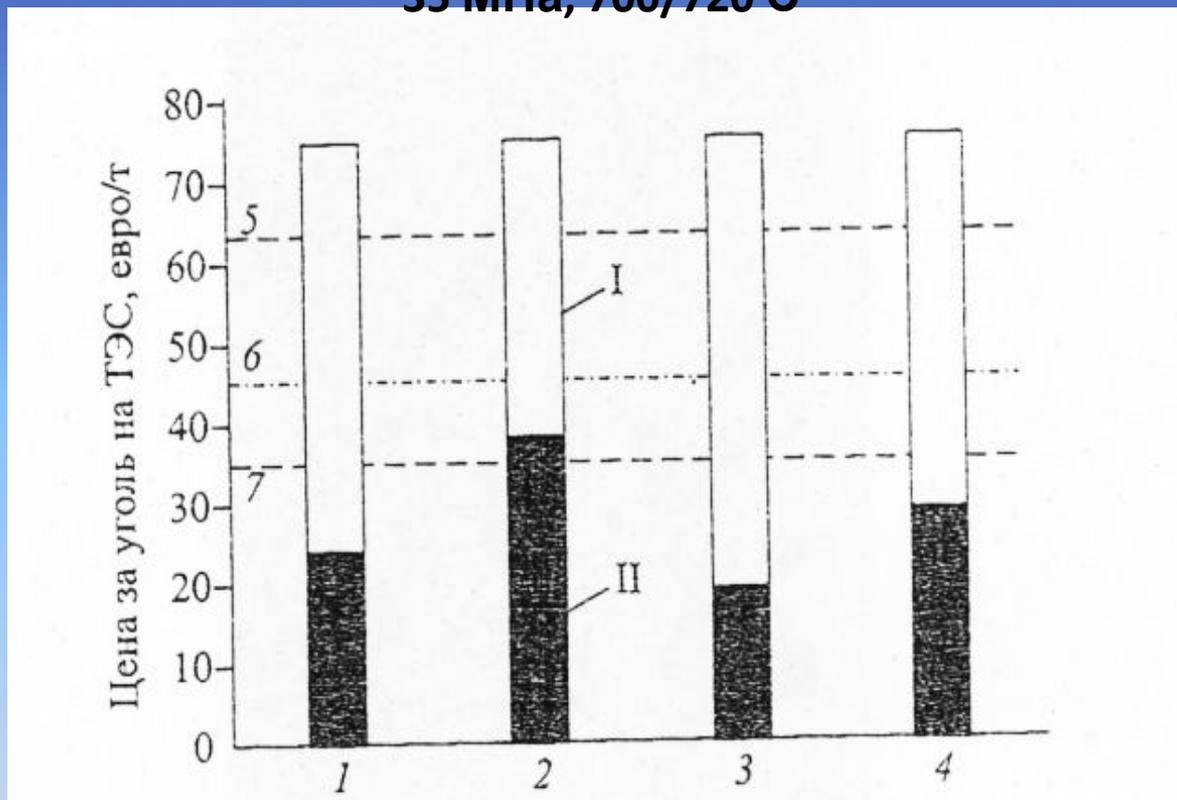
Результаты расчета энергоблока с двукратным промперегревом

	580/580/580	580/590/600	600/600/600
	45,51	45,67	45,90

Основные показатели проектируемого энергоблока 660 МВт

№	Параметр	Величина/размерность
1	Номинальная мощность	660 МВт
2	Давление перегретого пар	28 МПа
3	Температура перегрето пара / температура пара промперегрева	600/600 °С
4	Диапазон регулирования без изменения состава оборудования	100-60 %
5	Диапазон регулирования с подсветкой растопочным топливом	100-40 %
6	КПД нетто	44,5-45,4 %
7	Расход электроэнергии на собственные нужды	6 %
8	Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии	276 г.у.т/кВт*ч
9	Полный срок службы	не менее 40 лет
10	Расчетный ресурс оборудования	не менее 200 тыс.ч
11	Концентрация NO_x в дымовых газах	200 мг/м ³
12	Концентрация SO_x в дымовых газах	200 мг/м ³
13	Концентрация летучей золы в дымовых газах	30 мг/м ³

Экономическая целесообразность сооружения разных блоков на параметры 35 МПа, 700/720 С

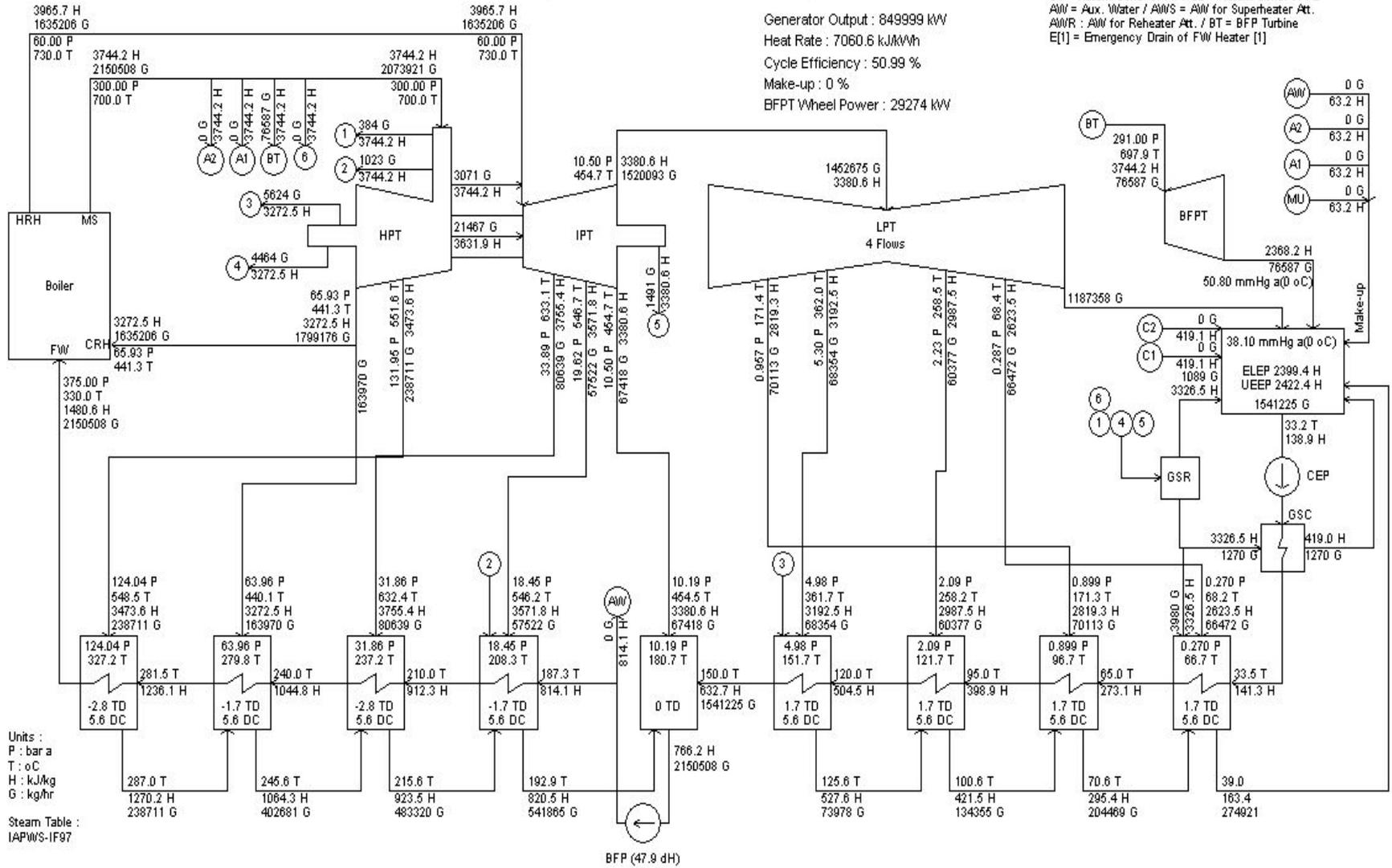


1 - блок 400 МВт с однократным промперегревом»; 2 – блок 400 МВт с двойным промперегревом; 3 – блок 930 МВт с однократным перегревом; 4 – блок 930 МВт с двойным промперегревом; 5 - максимальная стоимость угля в Западной Европе к 2020 г.; 6 – средняя цена за уголь в Западной Европе в 2007 г.; 7- минимальная цена за уголь в Западной Европе к 2020 г.; I – экономически целесообразно; II – экономически нецелесообразно

Legend :

- A1 = Aux. Steam(1) / A2 = Aux. Steam(2)
- C1 = Return Cond. of A1 / C2 = Return Cond. of A2
- AW = Aux. Water / AIMS = AWM for Superheater Att.
- AWR : AWM for Reheater Att. / BT = BFP Turbine
- E[1] = Emergency Drain of FW Heater [1]

Generator Output : 849999 kW
 Heat Rate : 7060.6 kJ/kWh
 Cycle Efficiency : 50.99 %
 Make-up : 0 %
 BFP Wheel Power : 29274 kW



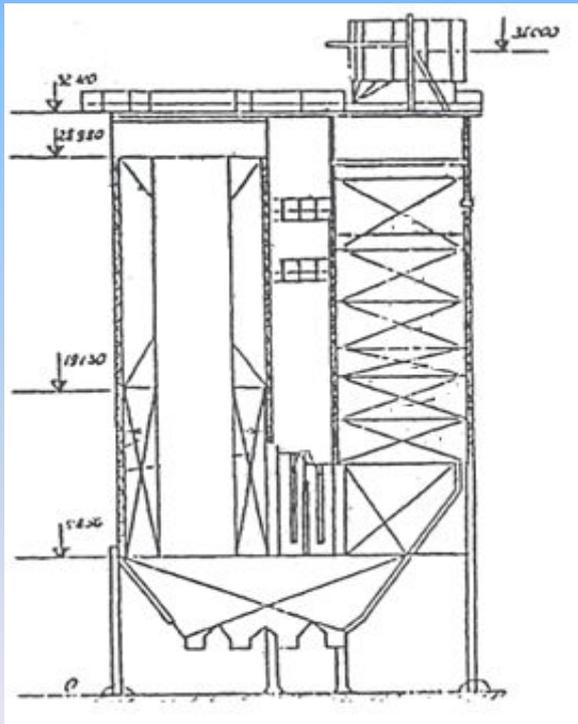
$$\text{Heat Rate} = (2150508 \times 3744.2 - 2150508 \times 1480.6 + 1635206 \times 3965.7 - 1635206 \times 3272.5 + 0 \times 63.2) / 849999 = 7060.6 \text{ kJ/kWh}$$

Характеристики блока 850 МВт на УСКП параметры пара

Параметр	Величина/размерность
Установленная электрическая мощность	850 МВт (брутто)
Параметры пара в голову ПТУ	
- Давление	30,0 МПа
- Температура	700 °С
Промперегрев	Однократный
- Давление	6,0 МПа
- Температура	730 °С
Давление в конденсаторе	10.14 кПа
Температура питательной воды на входе в котел	330 °С
Число регенеративных подогревателей	9 (4 ПВД, 1 Деаэратор, 4 ПНД, 1 или 2 Охладителя эжекторов)
ЦНД	1 двухпоточный
Высота последней лопатки ЦНД, число оборотов	1200 мм, 3000 об/мин
КПД	Увеличение КПД на 6% по сравнению с блоком ССКП с $t_0 = 600$ °С

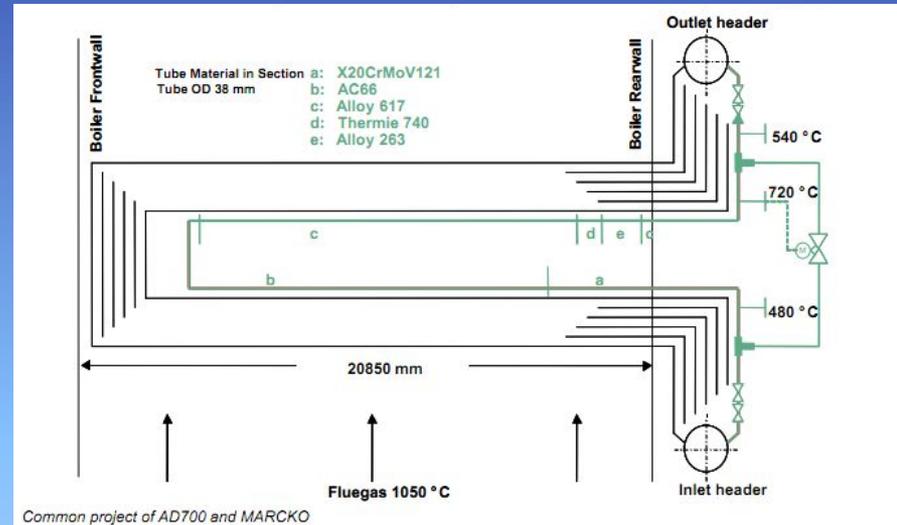
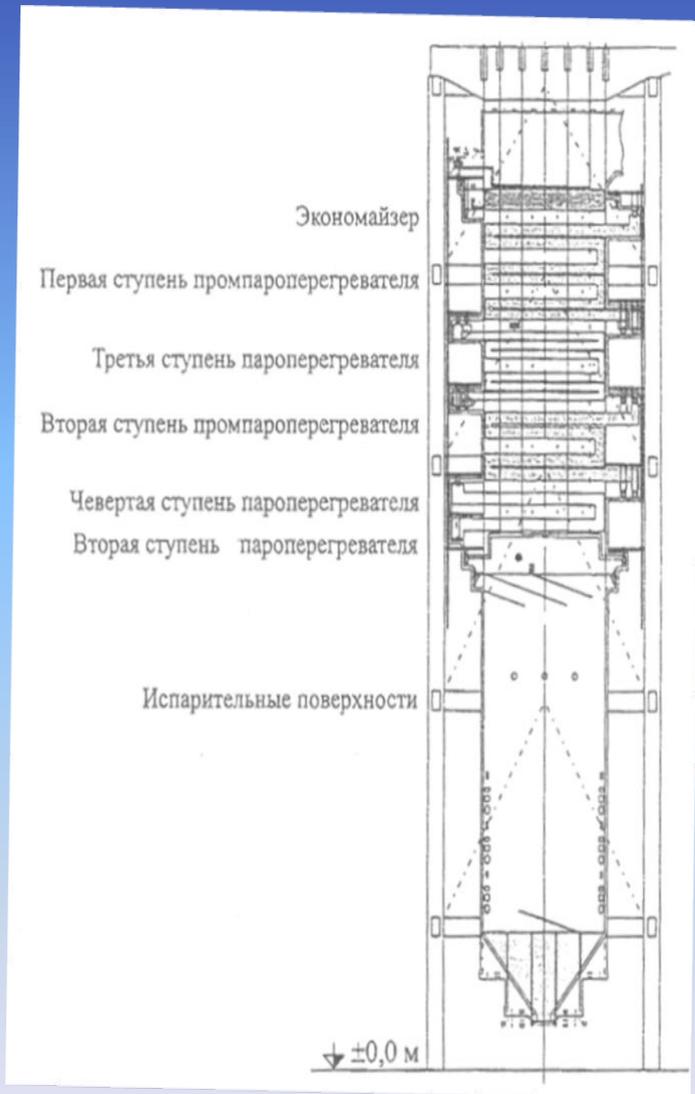
В Европе по программе «Therme» ведутся работы по материалам и конструкциям блока с температурой пара до 700°C, в США действует программа А-USC (УСКП) для достижения на пылеугольных блоках температуры пара 760°C.

Первый в мире котел на суперкритические параметры пара 29,4 МПа и 600 °С, изготовленный «Подольским машиностроительным заводом» (ОАО «ЗиО»), был пущен в России на ТЭЦ ВТИ в ноябре 1949 г.

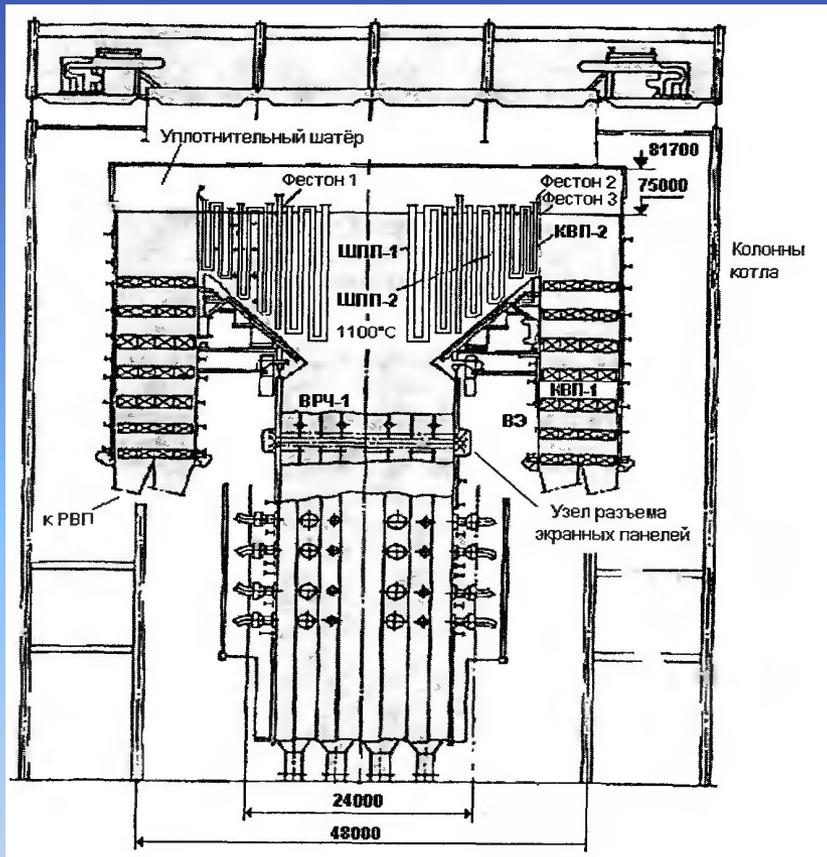


Котел
ПК-37

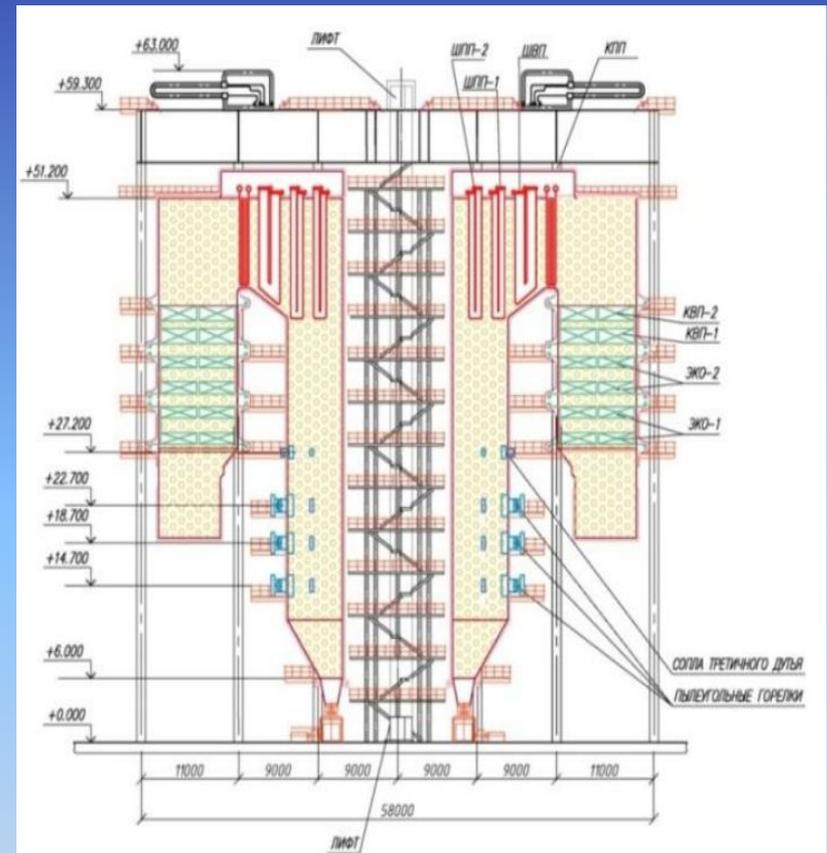
Характеристики	Котел 60-ОП (№7)	Блок СКР-100
Место установки	ТЭЦ ВТИ	Каширская ГРЭС
Время внедрения	1949 г. (600 °С) 1960 г. (650 °С)	1963 г.
Параметры пара	P=35 МПа t=650 °С	P=30 МПа t=650 °С
Паропроизводительность, т/ч	15	710
Марка сталей	15ХМ, ЭП17, ЭИ257, ЭИ695Р, ЭП184	12Х1МФ, ЭП184, ЭП17, ЭИ695Р
Число часов эксплуатации, тыс. ч	>200	>40



Испытательная часть перегревателей поверхностей котла башенного типа для электростанции Вейсвеллер



Проект котла Т-образной компоновки для энергоблока мощностью 500 МВт:
 ВРЧ-1-верхняя радиационная часть;
 ШПП- 1 и ШПП-2 – ширмовые поверхности пароперегревателя первой и второй ступеней; КВП-1 и КВП-2 первая и вторая ступени конвективного вторичного пароперегревателя; ВЭ-водяной экономайзер



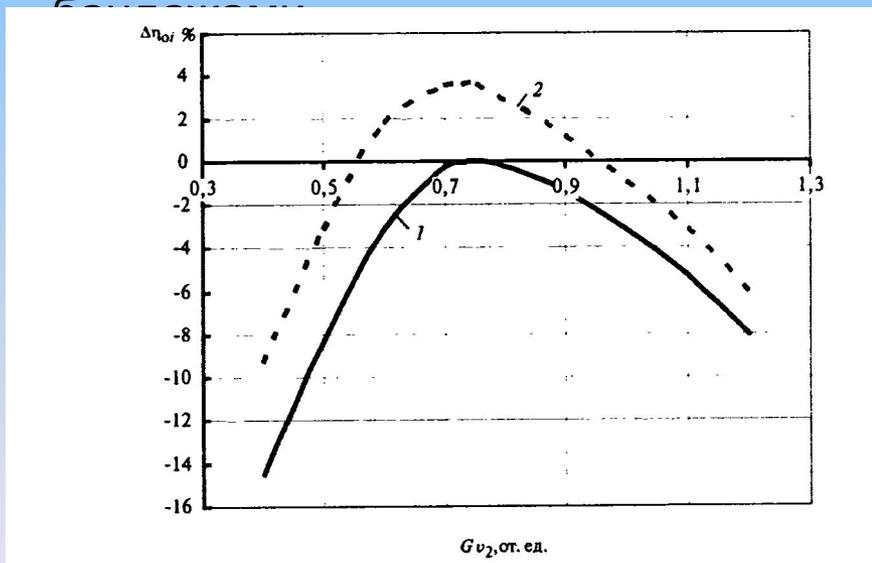
Котел Пп-1800-27,0-610/610 с кольцевой топкой

Сравнение котлов с традиционной Т-образной компоновкой и с кольцевой топкой

№ п/п	НАИМЕНОВАНИЕ	Котел с квадратной топкой	Котел с кольцевой топкой
1.1	Высота котла:	76,6	~57,0
	- по верху хребтовых балок, м Сравнение в процентах, %	100	~75
1.2	Существующая отметка низа фермы существующего здания, м	69,0	
2.	Масса поверхностей нагрева под давлением, кг	3 920 000	3 372 500
	Сравнение в процентах, %	100	86
3.	Металлоконструкции котла, кг	3 380 000	2 940 600
	Сравнение в процентах, %	100	87
4.	Масса собственно котла, кг	11 629 000	10 673 600
	Сравнение в процентах, %	100	92
	Стоимость оборудования собственно котла, млн. \$ (без НДС) Сравнение в процентах, %	~53,0 100	~48,0 90,6
5.	Стоимость проекта котла (с рабочими чертежами), включая техпроект котельной установки	~4,5 (1000 тыс. \$)	~5,5 (1050 тыс.\$)
6.	Масса КВО, кг	5 957 870	6 022 870
	Сравнение в процентах, %	100	101
	Стоимость КВО, млн. \$ (без НДС) Сравнение в процентах, %	25 100	~25,9 103
7.	Общая стоимость котельной установки, включая её базовый инжиниринг, млн. \$ (без НДС)	82,5	78,7
	Сравнение в процентах, %	100	95

Мероприятия по повышению экономичности ПТУ:

оптимизация зазоров в проточной части,
меридиональное профилирование ступеней паровой турбины,
применение модернизированных конструкций лабиринтовых и концевых уплотнений,
организация оптимальной схемы влагоудаления последних ступеней паровых турбин,
переход к новому типу облопачивания с цельнофрезерованными



Изменение КПД последней ступени ЦНД в зависимости от относительного объема расхода пара:

1 — ступень с ранее применяемыми лопатками; 2 —

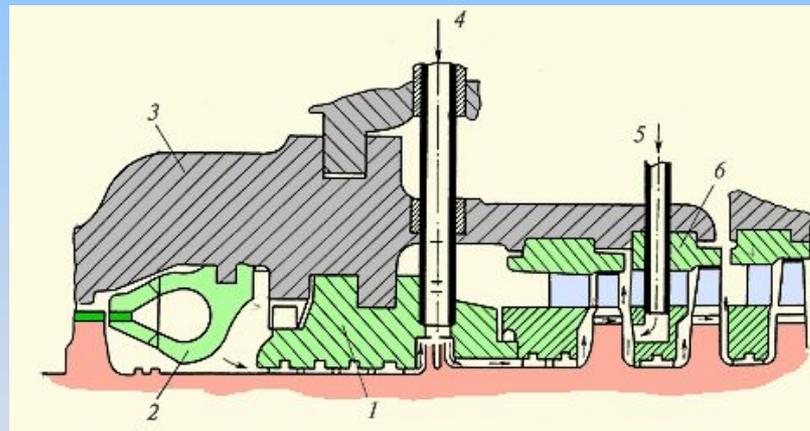
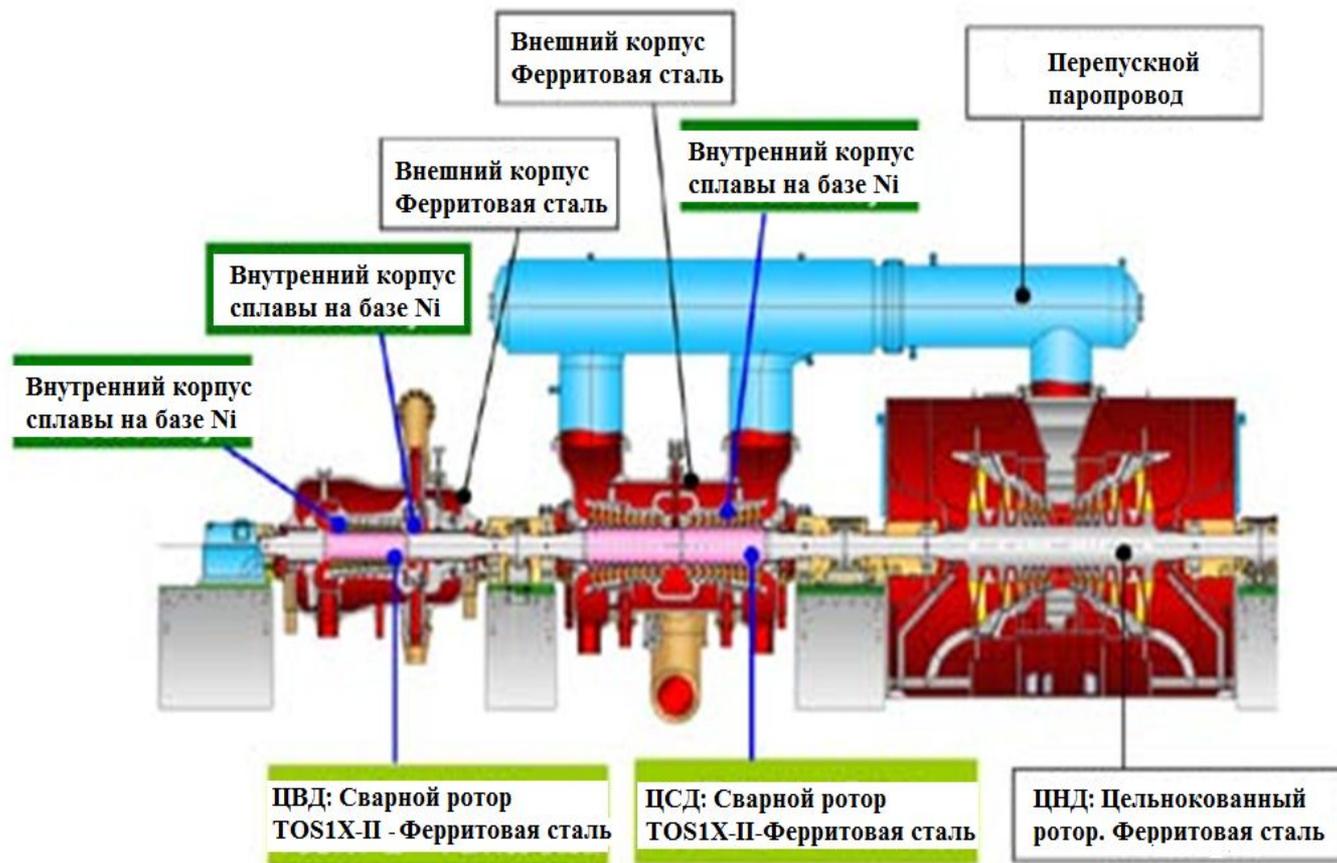
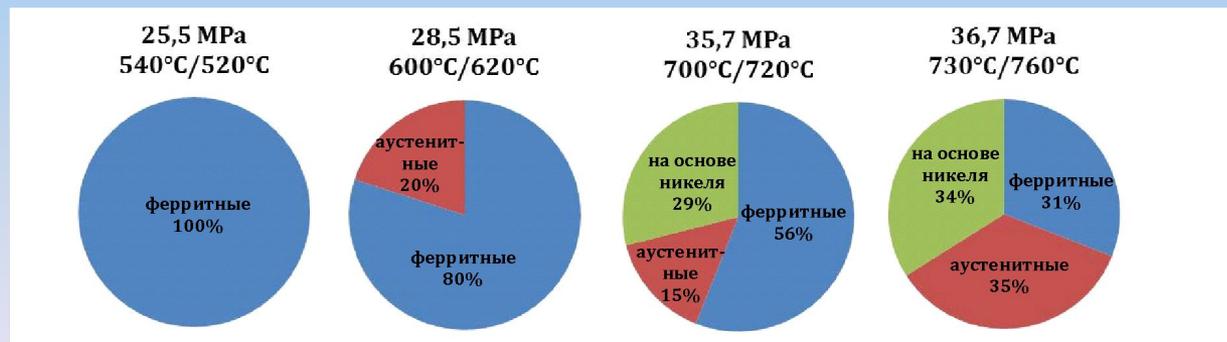
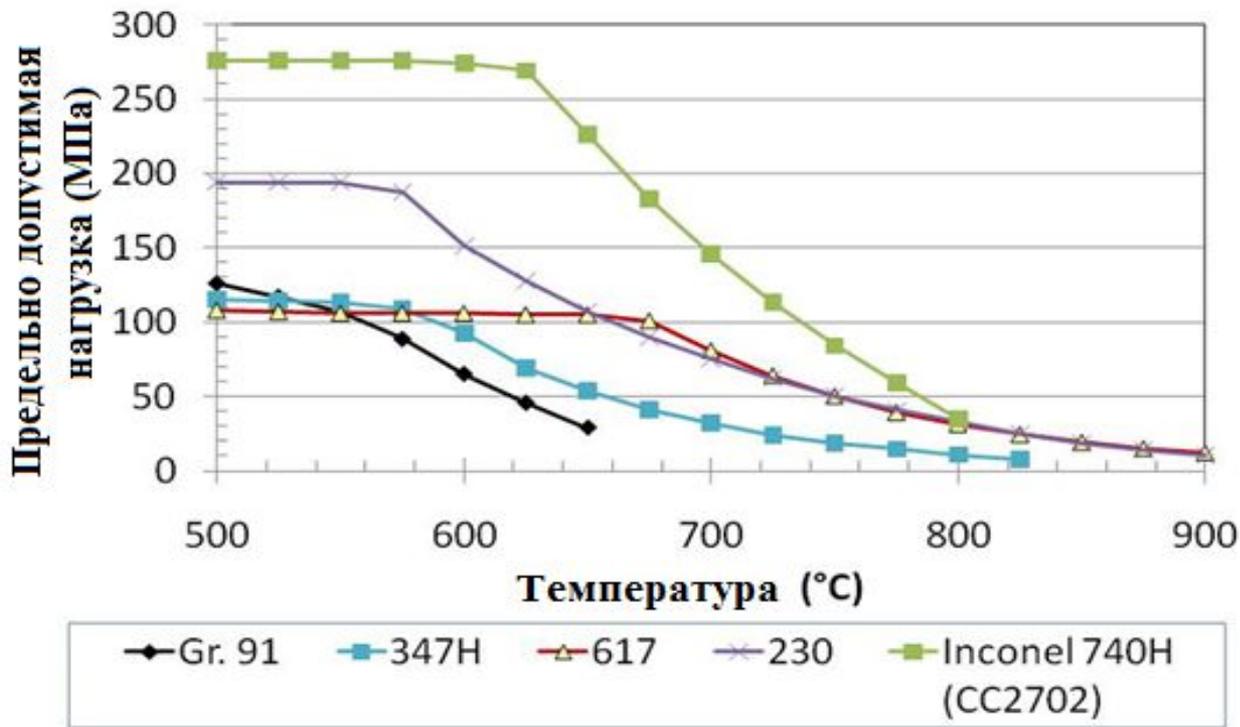


Схема универсальной системы охлаждения ротора с совмещенным ЦВД японской фирмы Тошиба мощностью 700 МВт на параметры 24.1 Мпа, 593 °С/ 593 °С:

1 – промежуточное уплотнение между ЧВД и ЧСД; 2 – сопловая коробка ЧВД; 3 – внутренний корпус; 4 – подача охлаждающего пара из первого отбора; 5 – подача охлаждающего пара из выходного патрубка ЧВД (второго отбора, холодной нитки промперегрева); 6 – диафрагма 2-й ступени

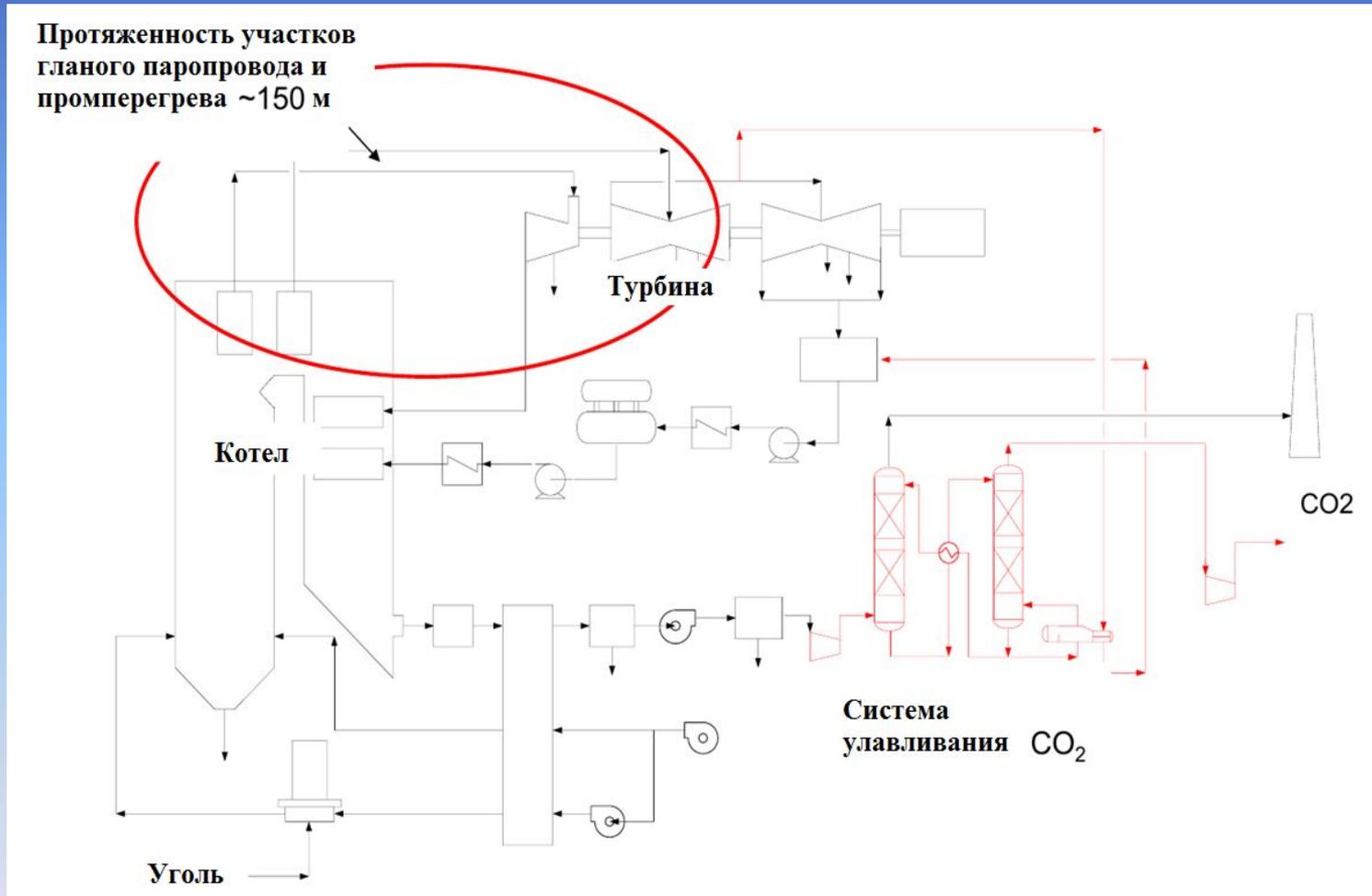


Концепция конструкции ПТУ на УСКП параметры (840 MW, 30 МПа, 700/730С)



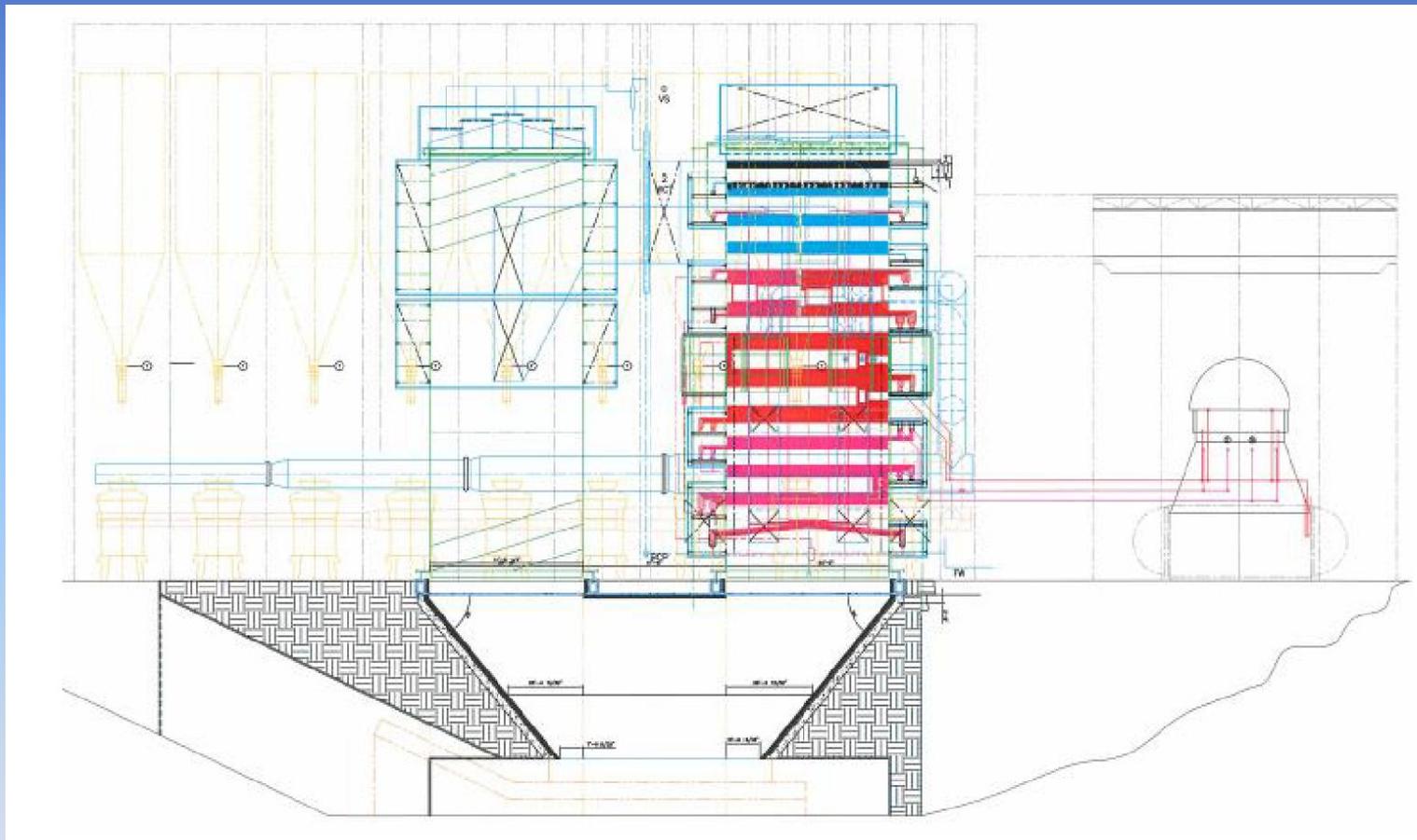
Изменение сортамента сталей в зависимости от параметров пара паросиловых установок

Расположение наиболее затратных участков паропровода в энергоблоке УСКП



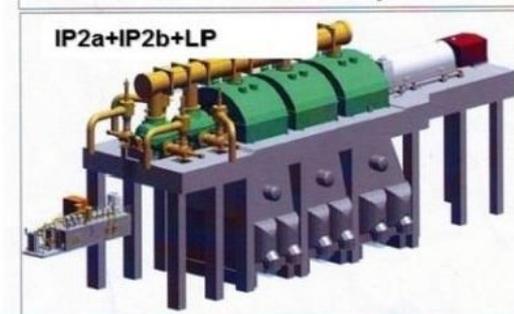
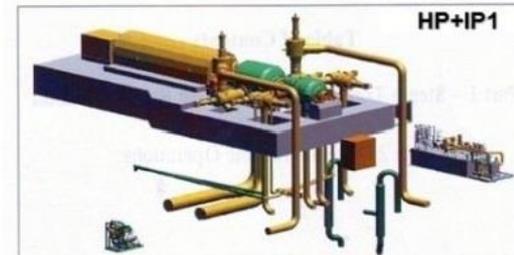
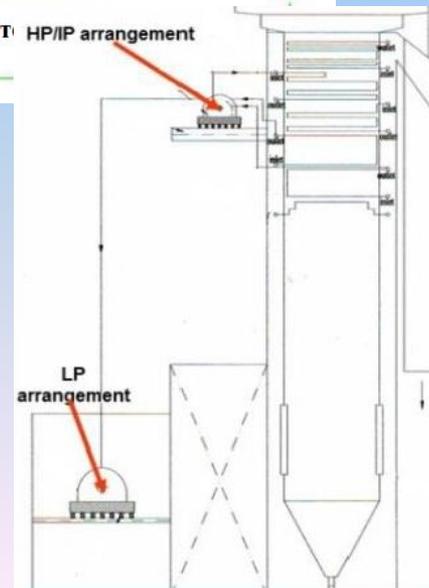
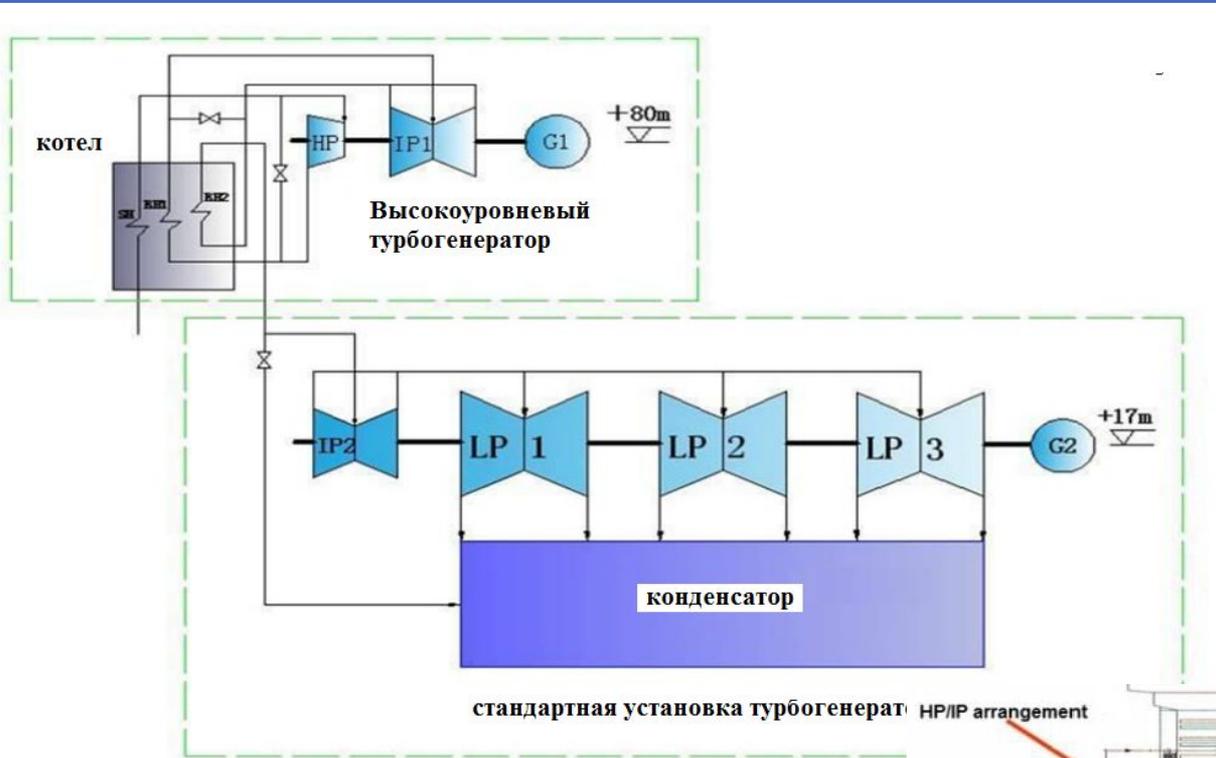
паропроводы выполняются из никелевых сплавов, стоимость которых может достигать до 110 долл.США за 1 кг

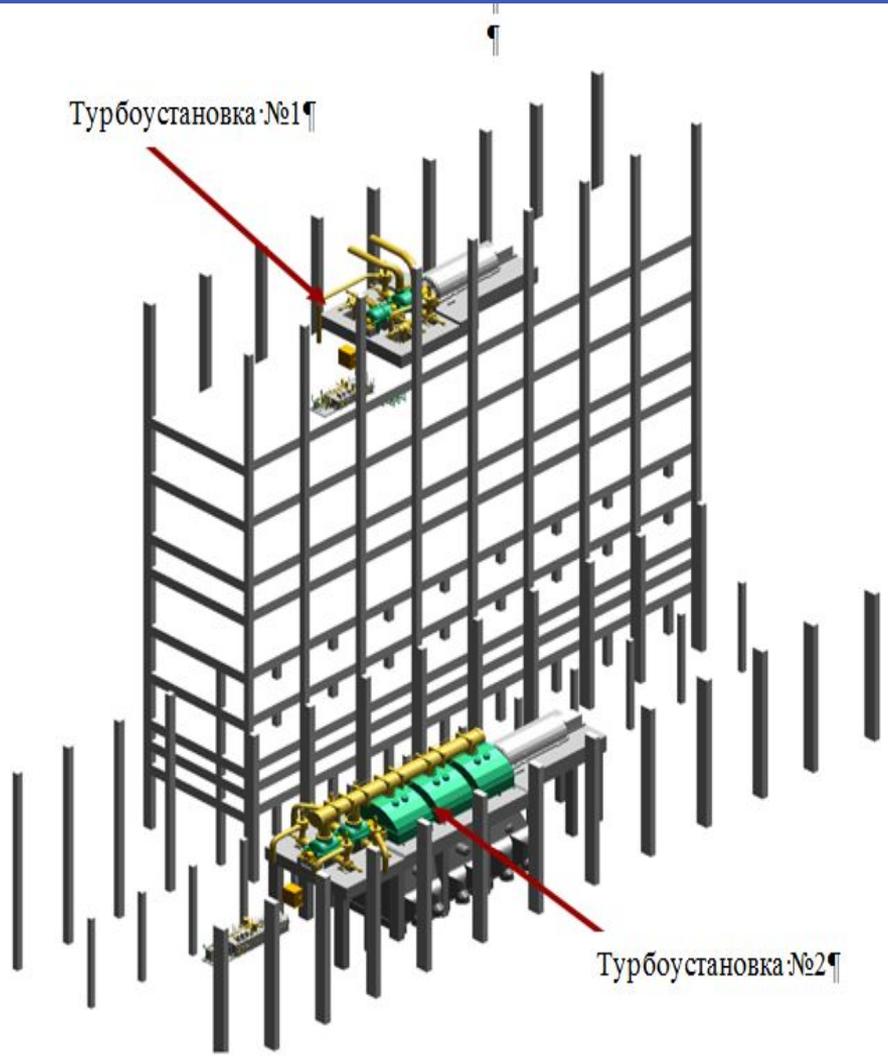
Компания Babcock и Wilcox предложила проект перевернутого башенного котла представленного на рис



Использование такой компоновки позволяет сократить почти на половину протяженность паропроводов острого пара и системы промперегрева и уменьшить стоимость проекта

Разноуровневая компоновка

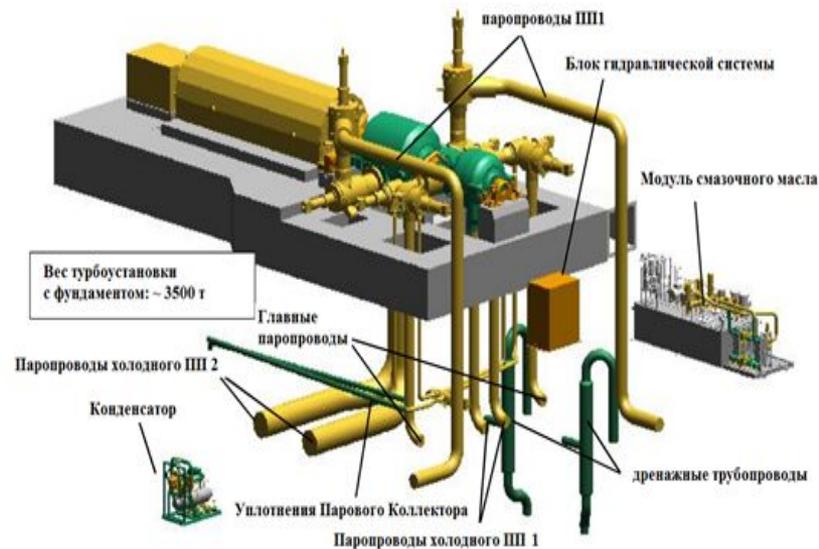




Турбоустановка №1

Турбоустановка №2

Рисунок 1.71 -- План расположения паровых турбин высокого и нижнего уровня для энергоблока электрической мощностью 1350 МВт с двойным перегревом пара



Вес турбоустановки с фундаментом: ~ 3500 т

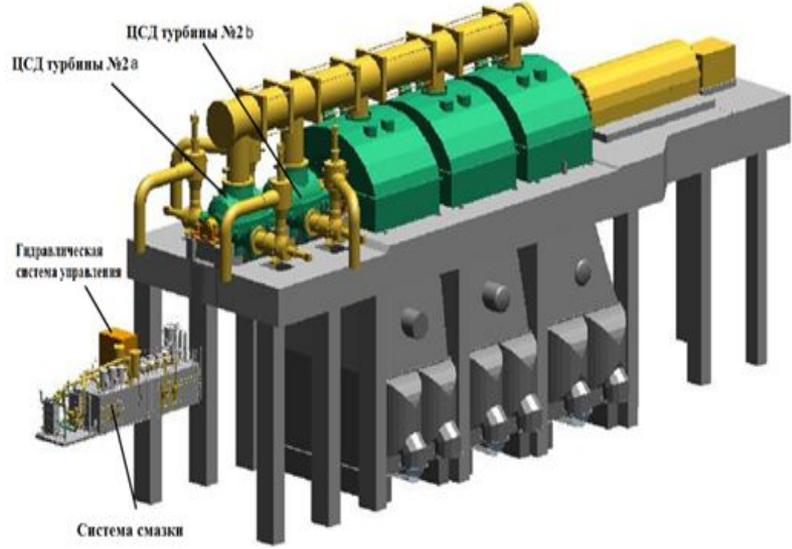


Рисунок 1.72 -- Состав турбоустановок

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СХЕМ УСКП

Проведены расчетные исследования схем энергоблоков УСКП с целью определения влияния параметров цикла на показатели эффективности. В качестве расчетной модели были выбраны схемы на основе турбоагрегата единичной мощностью 1000 МВт с однократным и двукратным промежуточным перегревом.

Факторы, влияющие на эффективность цикла:

начальные параметры пара

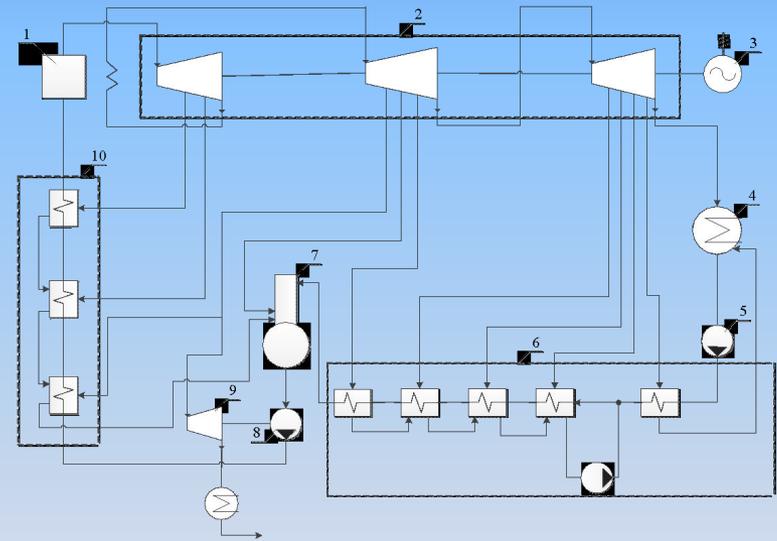
параметры промежуточного перегрева

температура питательной воды

схемы включения питательной установки

Целевой индикатор

КПД 51%



Принципиальная тепловая схема энергоблока УСКП с однократным промперегревом

1 – паровой котел; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – конденсатор; 5 – насос основного конденсата; 6 – группа подогревателей низкого давления; 7 – деаэратор; 8 – питательный насос; 9 – турбопривод питательного насоса с собственным конденсатором; 10 – группа подогревателей высокого давления

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА

Изменение начальной температуры оказывает существенное влияние на эффективность схемы, так при начальном давлении 30 МПа переход к температуре острого пара с 600 °С до 700 °С дает относительный прирост в 4,31 %.

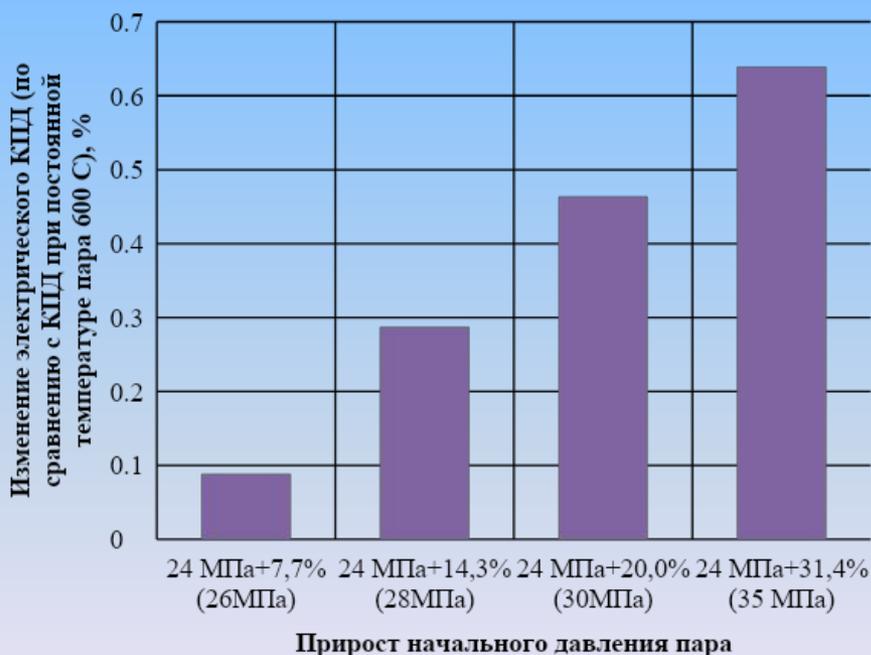


Рис. 2. Влияние начального давления на КПД цикла

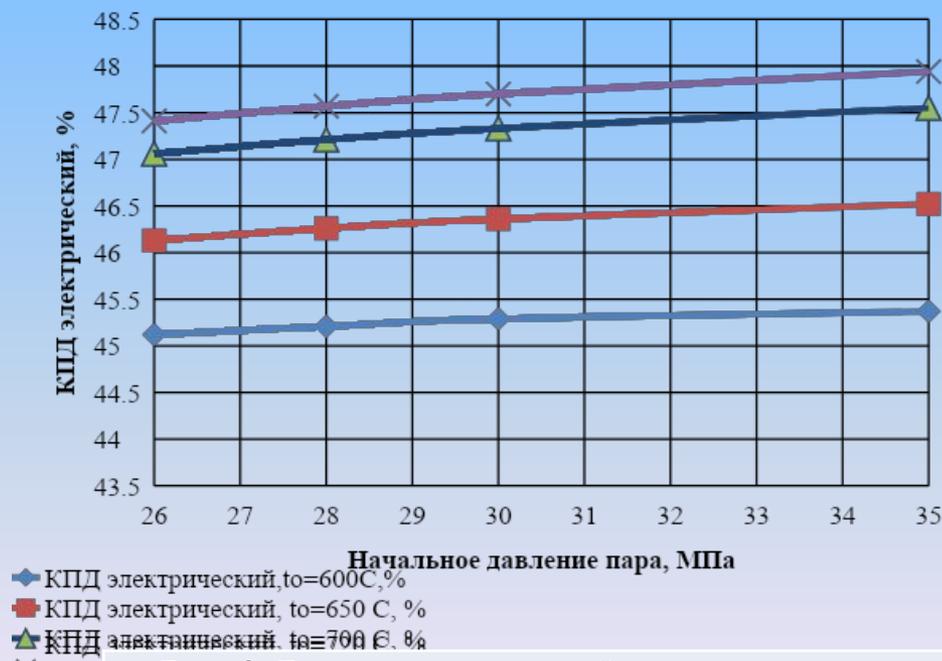


Рис. 3. Влияние начальной температуры на КПД цикла

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКРАТНОГО ПРОМПЕРЕГРЕВА

Оптимуму КПД соответствуют величины давления промежуточного перегрева в диапазоне 20-25 % от начального давления, что коррелирует с данными для блоков на сверхкритические параметры.

При применении однократного промперегрева влажность в последних ступенях турбины составляет не более 7%

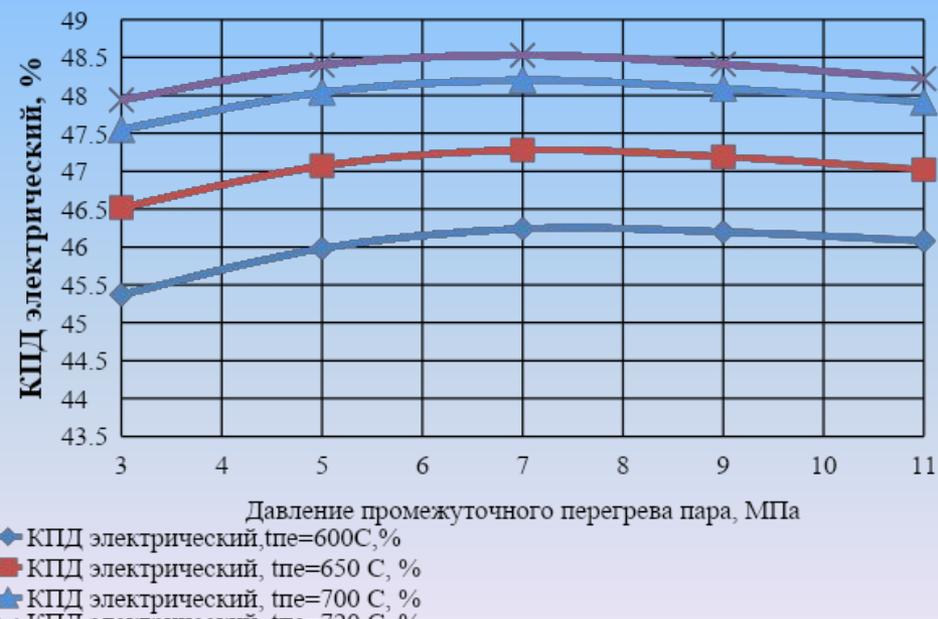


Рис. 4. Зависимость электрического КПД от температуры промежуточного перегрева пара при постоянном начальном давлении 35 МПа, начальная температура пара равна температуре промперегрева

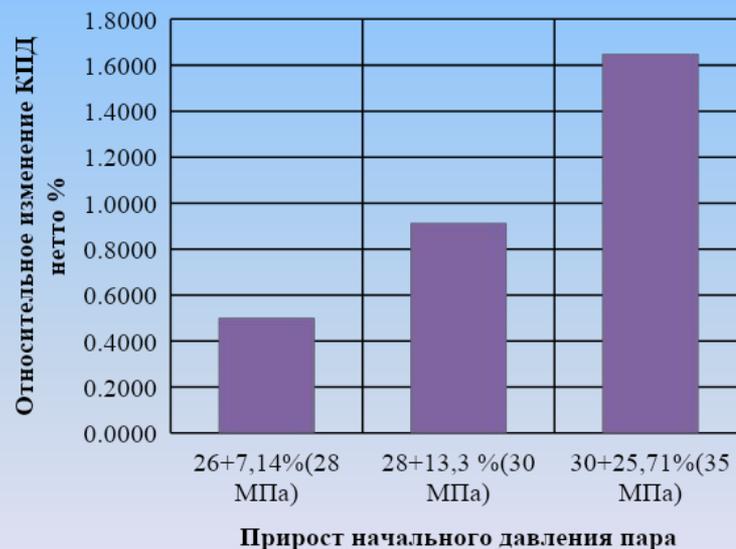


Рис. 5. Зависимость изменения относительного КПД нетто блока УСКП от начального давления пара

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУКРАТНОГО ПРОМПЕРЕГРЕВА

Диапазон оптимальных значений первого и второго промежуточных перегревов составляет 25-30% и 6-10% от начального давления соответственно.

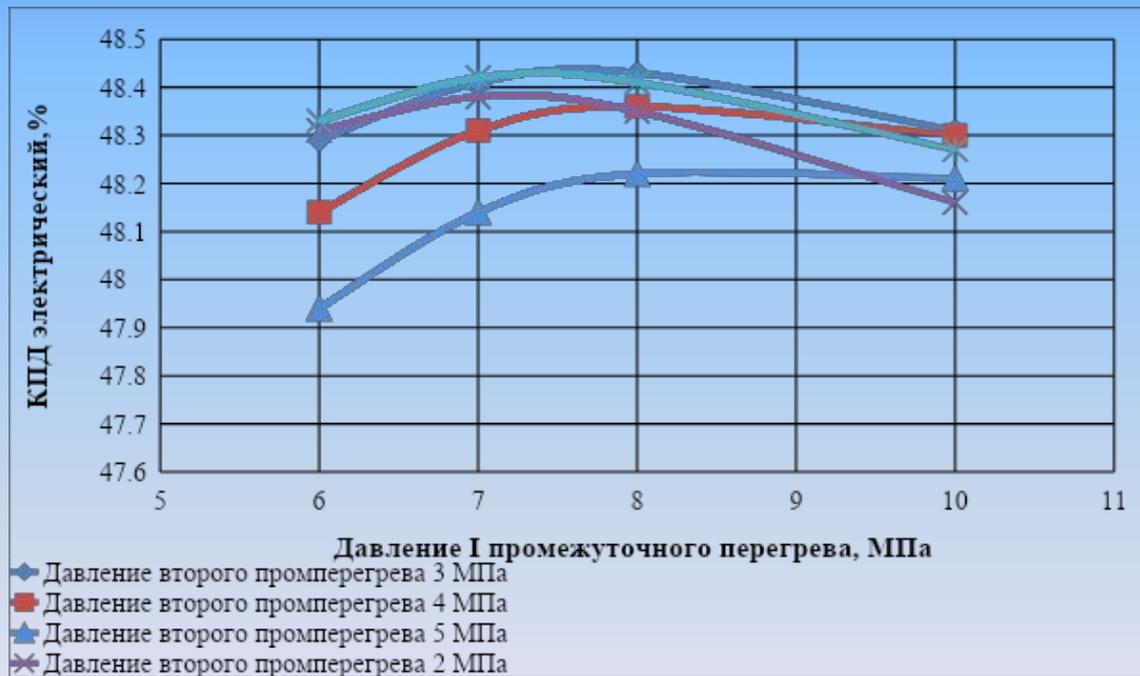


Рис. 6. Зависимость электрического КПД нетто для различных давлений промперегрева (при начальном давлении 30 МПа)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

Оптимальное значение температуры питательной воды соответствует диапазону 320-340 С в зависимости от начального давления пара

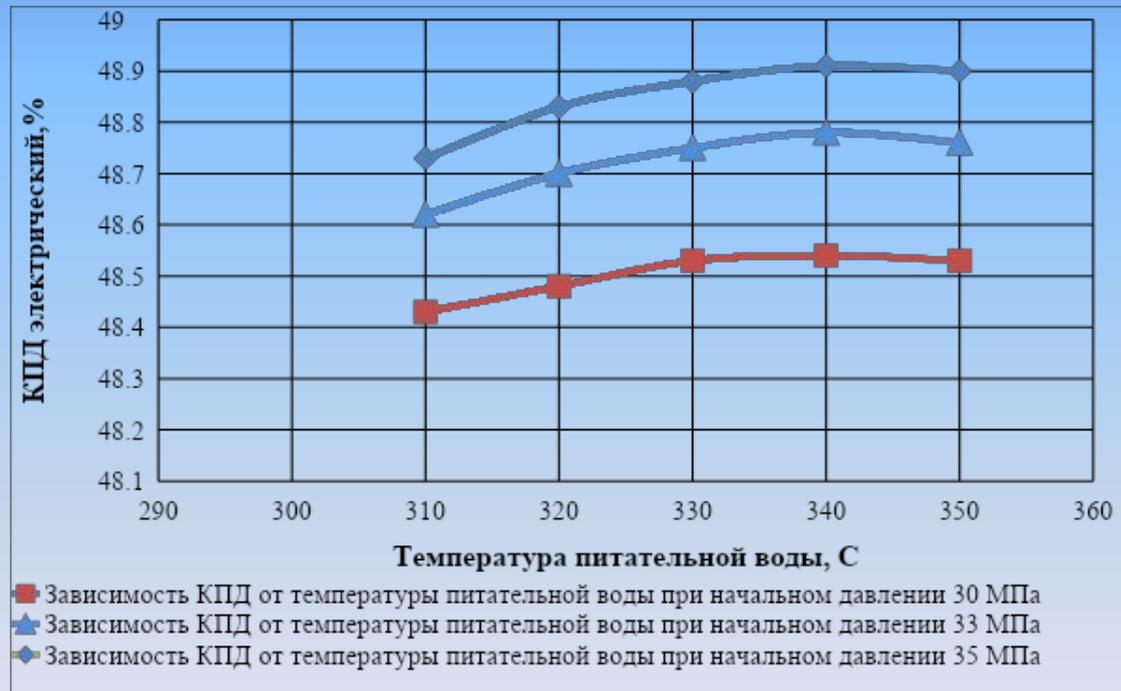


Рис. 7. Зависимость температуры питательной воды от начального давления цикла

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Определена наиболее эффективная схема включения привода питательного насоса для объекта исследования- двухподъемная с турбоприводами. Электроприводные насосы не выбраны по причине технических ограничений

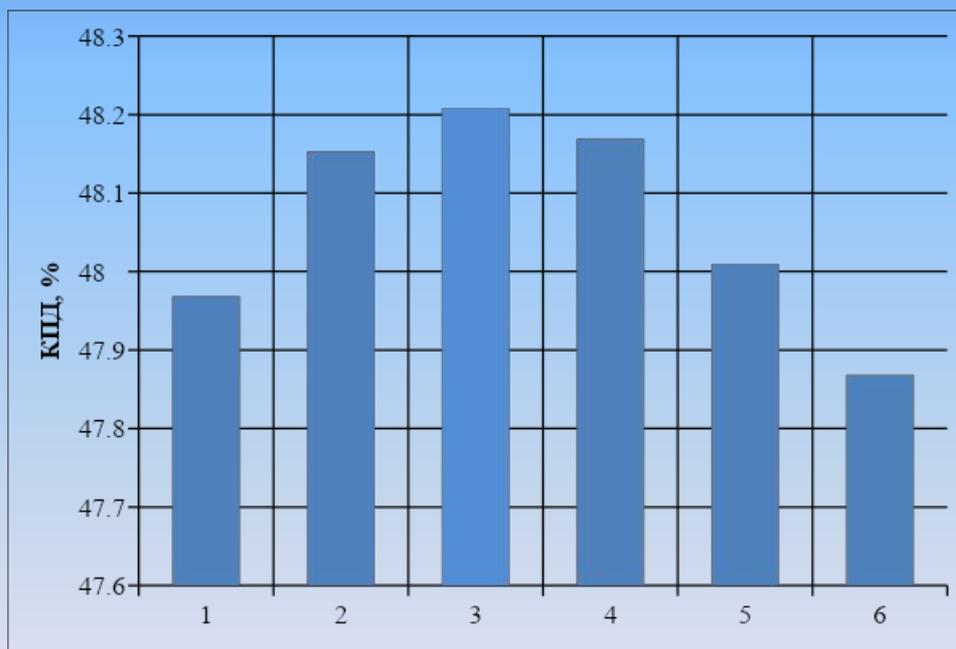


Рис. 8. КПД нетто энергоблока 1000 МВт на УСКД с различными схемами включения питательных насосов: 1 – одноподъемная с ПТН, 2 – одноподъемная с ПЭН, 3 – двухподъемная с ПЭН, 4 – двухподъемная с ПТН 1-й ступени и ПЭН 2-й ступени, 5 – двухподъемная с ПЭН 1-й ступени и ПТН 2-й ступени, 6 – двухподъемная с ПТН.