



# Теплообменное оборудование ТЭС и АЭС

---

Лектор: профессор каф. АТЭС Коротких А.Г.



# Содержание

---

- Парогенераторы
- Натрий натриевый ТА
- Паровые котлы



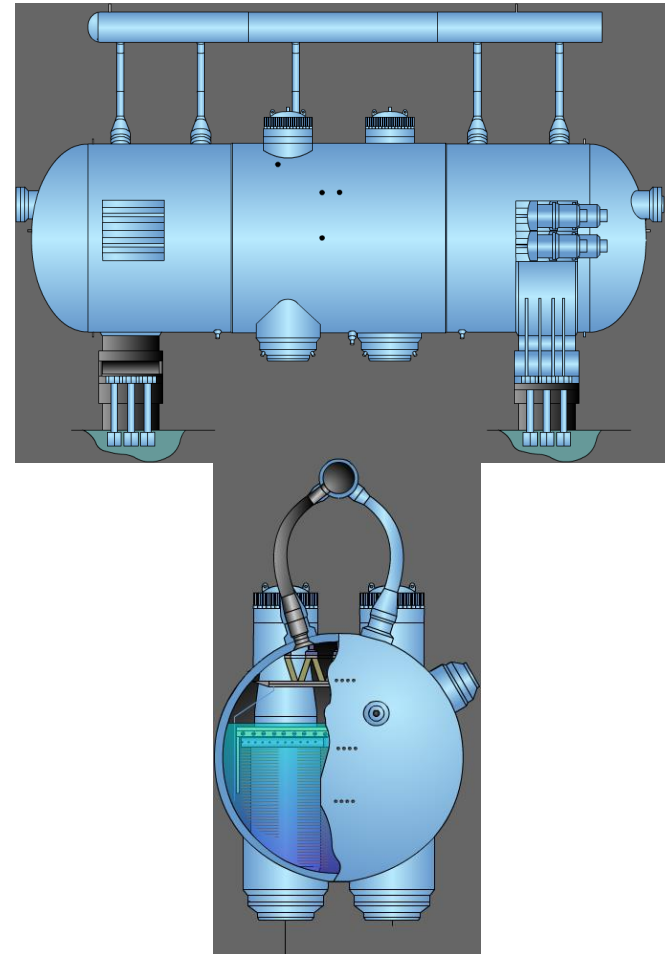
# Введение

---

- Парогенераторы относятся к числу наиболее ответственного теплообменного оборудования, поставляемого на атомные электростанции.

# Парогенераторы для АЭС с реакторами ВВЭР

- Парогенераторы для АЭС с реакторами типа ВВЭР представляют собой рекуперативный теплообменный аппарат с погруженной поверхностью теплообмена, выполненной из горизонтально расположенных U-образных теплообменных змеевиков.





# Модификации ПГ

---

- Изготавливаются парогенераторы для энергоблоков с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 для отечественных и зарубежных АЭС. В настоящее время Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск» изготовил и поставил более 220 парогенераторов. Парогенераторы для АЭС с ВВЭР-1000 изготавливаются двух модификаций: ПГВ-1000М и ПГВ-1000У.

# Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск»



# «ЗиО-Подольск»

- Парогенераторы поставлены на атомные электростанции России, Украины, Армении, Финляндии, Германии, Кубы, Болгарии, Ирана, Китая, Индии.

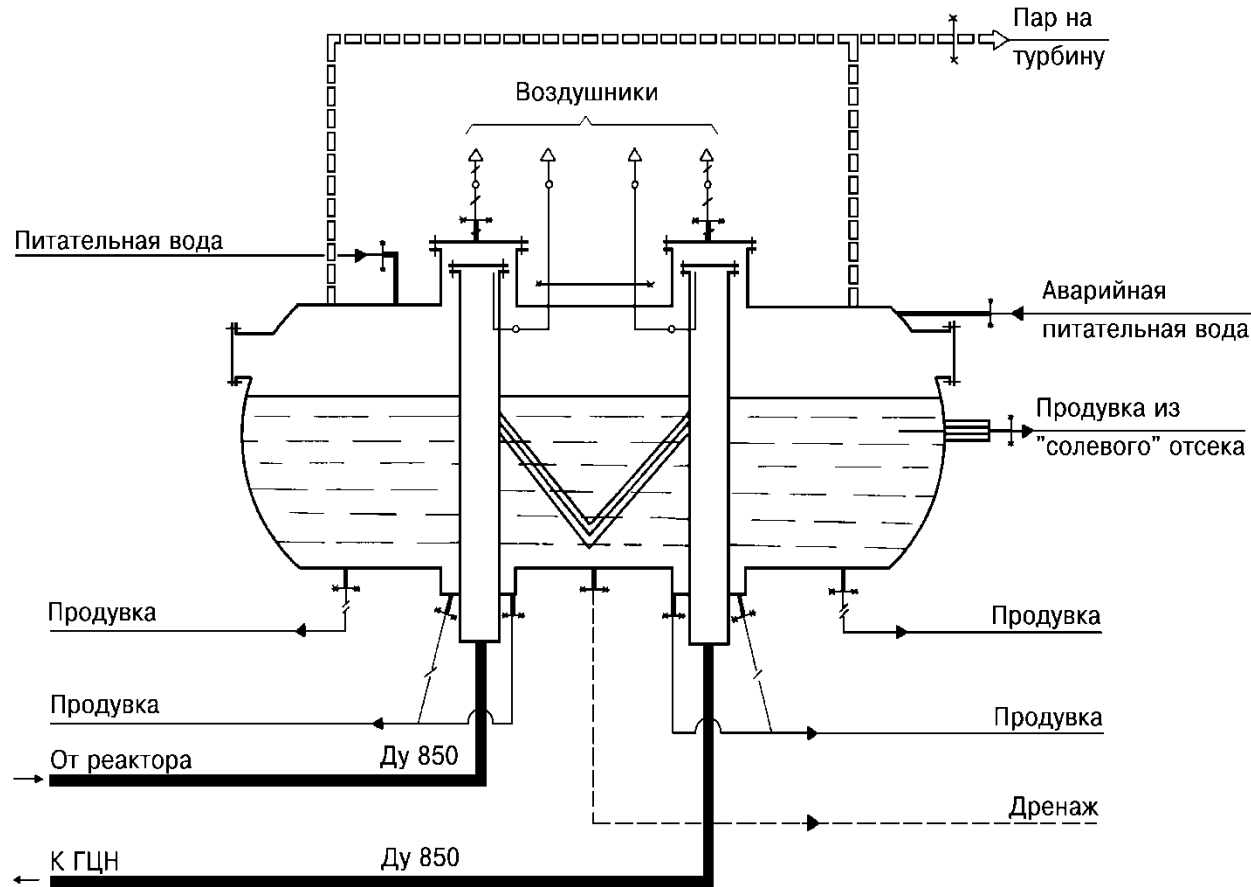


# Технические показатели ПГВ-1000

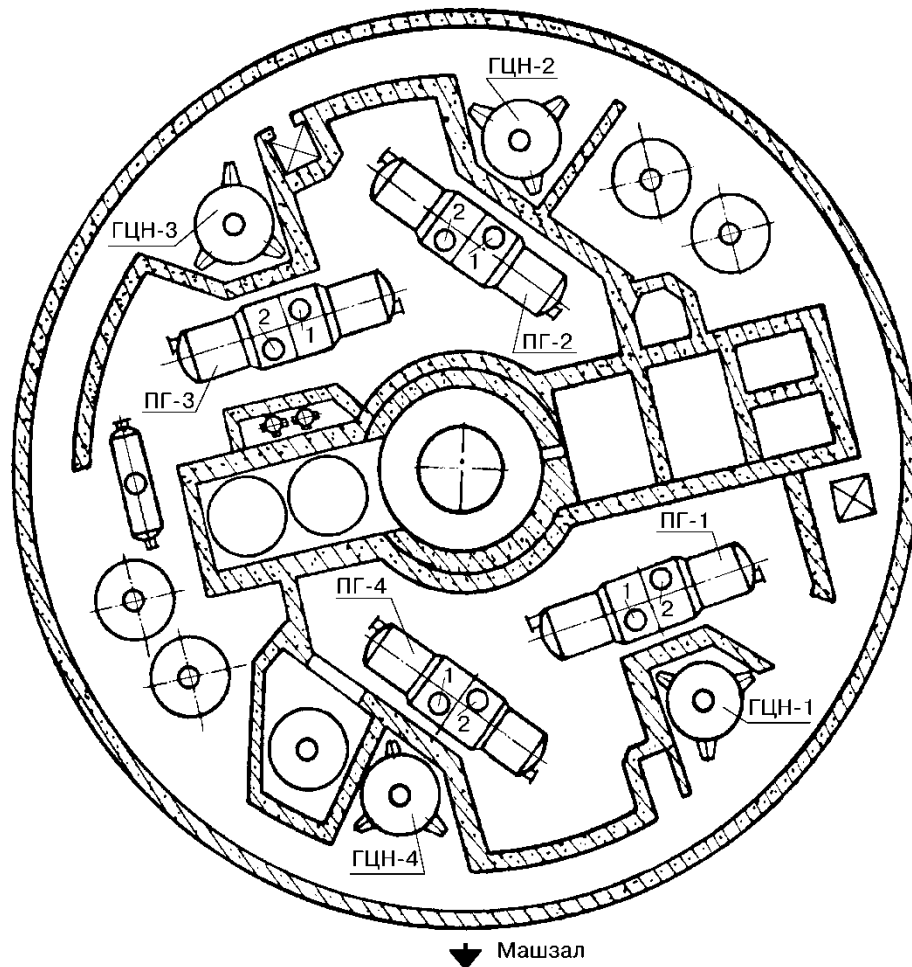
	<b>ПГВ-1000М</b>	<b>ПГВ-1000У</b>
Тепловая мощность, МВт	750	750
Паропроизводительность, кг/с	408	408
Температура пара на выходе, °С	278,5	278,5
Давление пара, МПа	6,27	6,27
Влажность пара на выходе, %	0,2	0,2
Температура питательной воды, °С	220	220
Гидравлическое сопротивление по первому контуру, МПа	0,12	0,17
Материал коллектора теплоносителя	10ГН2МФА-ЭШП	08Х18Н10Т-ВД
Длина аппарата, м	14,75	14,75
Диаметр корпуса, м	4,21	4,21
Масса, т	315	322



# Схема включения ПГВ-1000М

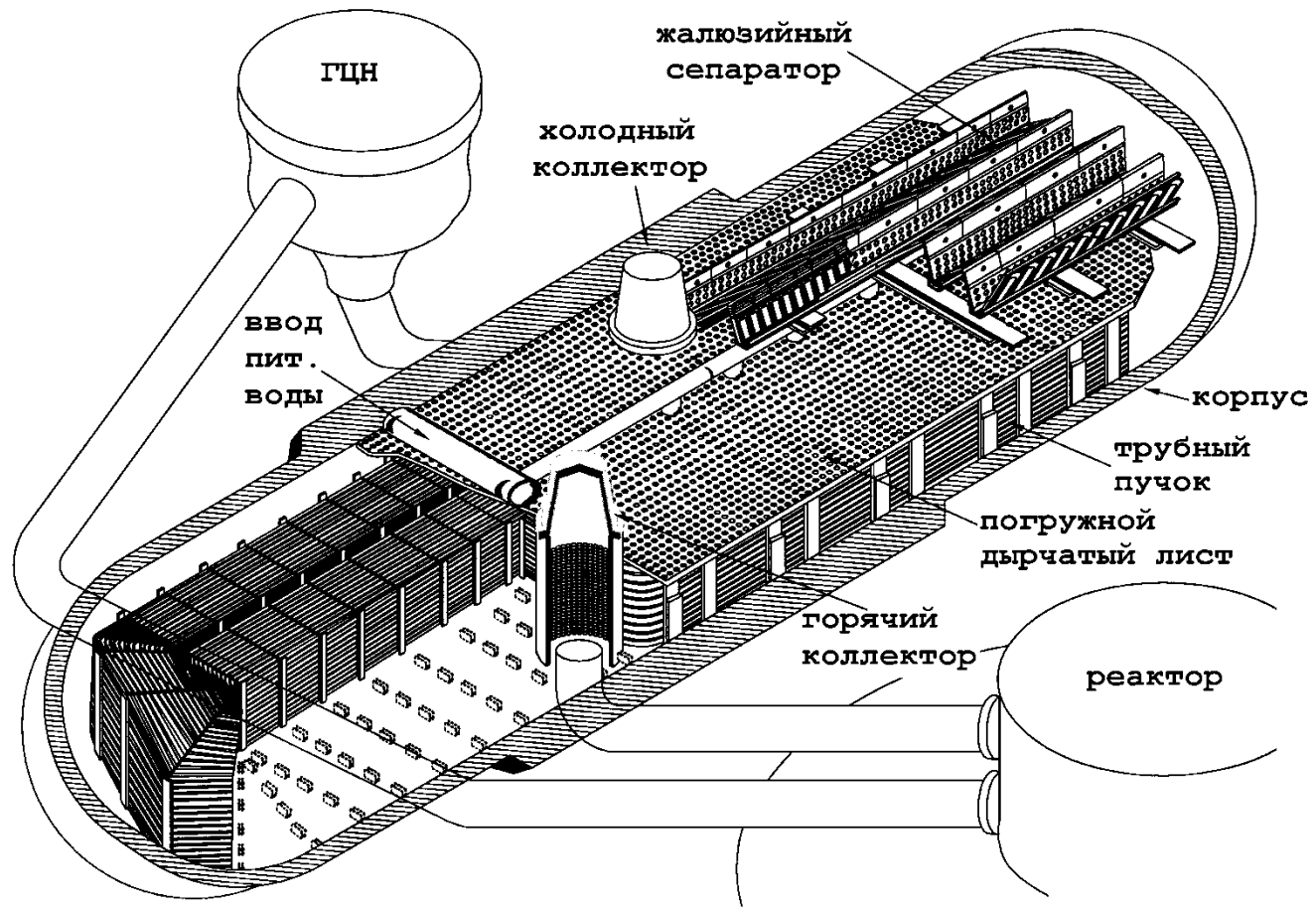


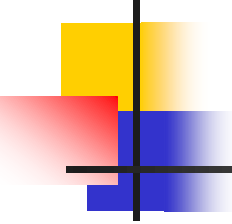
# Расположение ПГ в гермооболочке



- 1 – «Горячий» коллектор;
- 2 – «Холодный» коллектор.

# Принципиальное устройство ПГВ-1000М





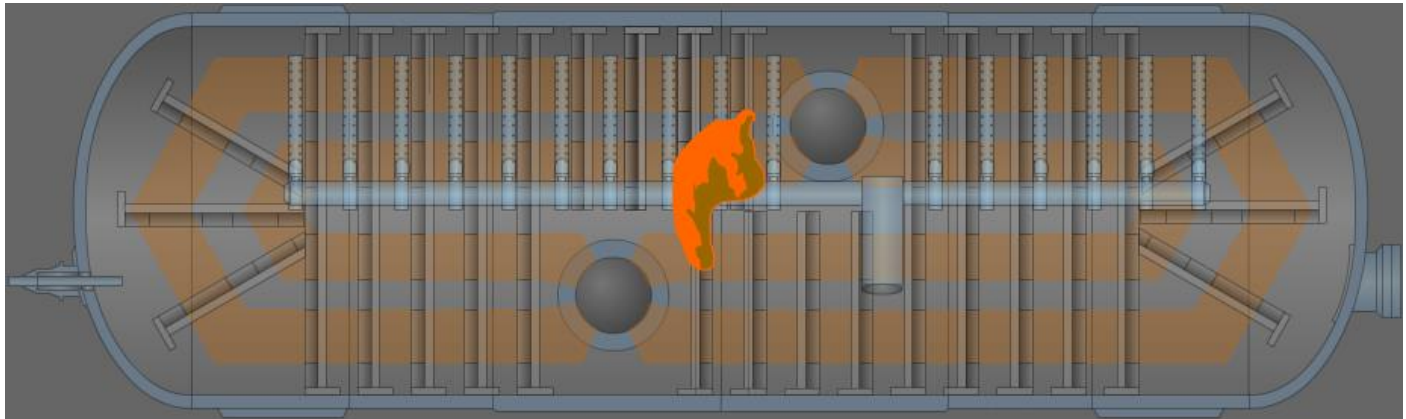
# Проблемы эксплуатации ПГВ-1000М на БалАЭС

---

- Трещины перемычек холодных коллекторов ПГ, обнаруженных на ПГ блока №1 в 1988г., 2ПГ-2 в 1989г., 2ПГ-3 в 1995г. Эта проблема имела массовый характер на всех АЭС с реакторами ВВЭР-1000 начиная с в конце 1986 года.
- Недостоверность показаний уровнемеров по причине забивания импульсной линии 4-х метрового уравнительного сосуда и установки уровнемеров с разных сторон ПГ: «холодного» и «горячего» торцов ПГ.

# Проблемы эксплуатации ПГВ-1000М на БалАЭС

- Проблема коррозии металла трубной системы ПГ со стороны второго контура - повреждение теплообменных трубок из-за подшламовой коррозии. Накопление шлама происходит в районе 2-4 дистанционирующих решеток от «горячего» коллектора в сторону «холодного» торца, из-за малой кратности циркуляции в этом районе.



# Парогенераторы ПГН-200М для АЭС с реактором БН

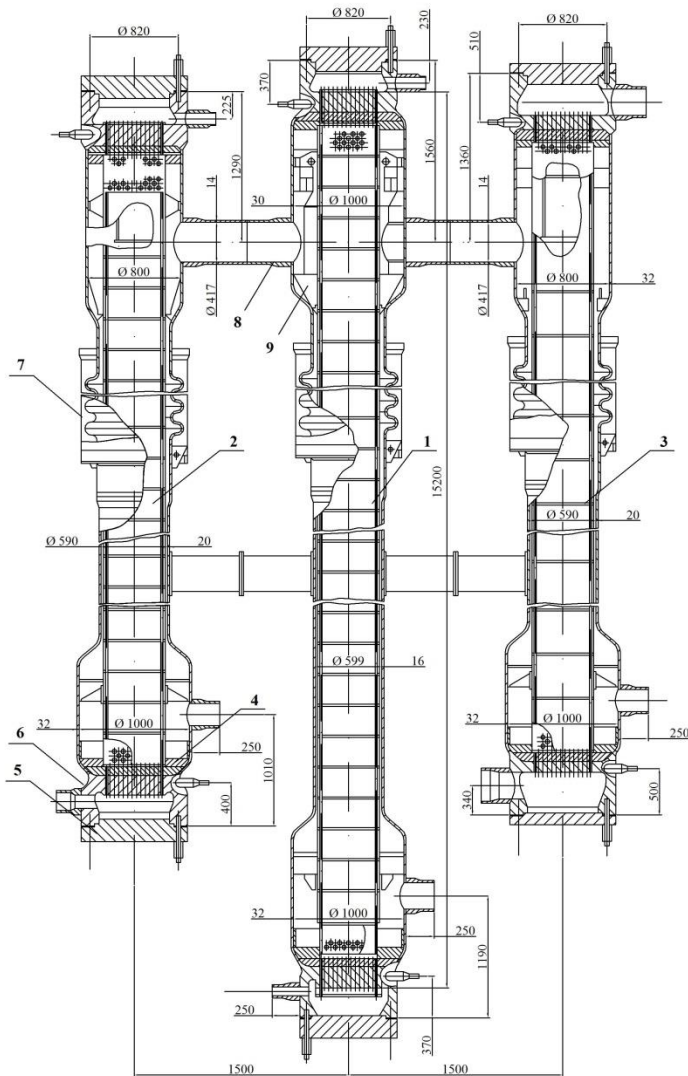
- ПГН-200М – прямоточный теплообменный аппарат, состоящий из восьми параллельно включенных по рабочим средам секций. Предназначен для выработки перегретого пара высокого давления.



# Описание парогенератора ПГН-200М

- Каждая секция состоит из 3-х модулей: испарителя, пароперегревателя и промежуточного пароперегревателя, объединенных трубопроводами обвязки по воде, пару и натрию. Движение сред в парогенераторе противоточное. Натрий движется сверху вниз. Модульность конструкции дает возможность оперативной замены отработавших свой срок модулей и, при необходимости, отсечение проблемных модулей без остановки реактора.

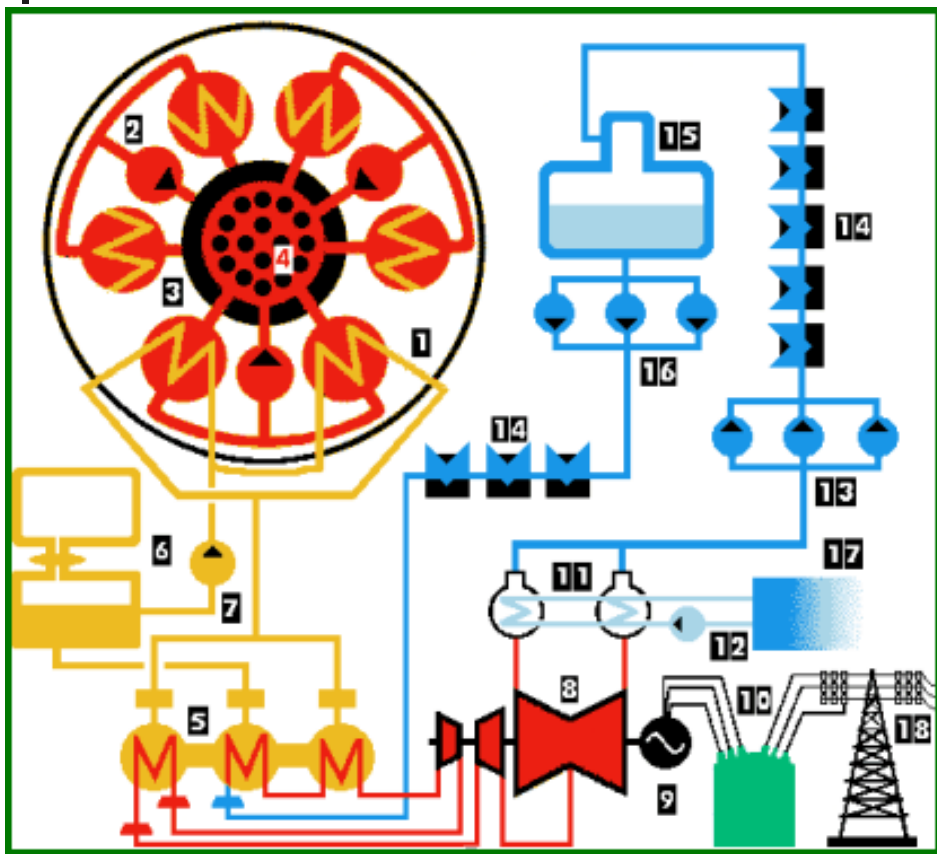
# Секция парогенератора ПГН-200М



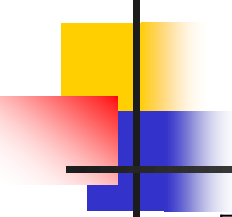
- 1 – испаритель;
- 2 – пароперегреватель;
- 3 – промпароперегреватель;
- 4 – плита-вытеснитель;
- 5 – съемная крышка;
- 6 – трубная доска;
- 7 – сильфон;
- 8 – патрубки входа натрия в ИСП из ОП и ПП;
- 9 – входная камера теплоносителя.



# Тепловая схема энергоблока



1-реактор; 2-главный циркуляционный насос 1 контура; 3-промежуточный теплообменник; 4-тепловыделяющие сборки; 5-парогенератор; 6-буферная и сборная емкости; 7-главный циркуляционный насос 2 контура; 8-турбоустановка; 9-генератор; 10-трансформатор; 11-конденсаторы; 12-циркуляционные насосы; 13-конденсатные насосы; 14-подогреватели; 15-деаэратор; 16-питательные насосы; 17-пруд-охладитель; 18-отпуск электроэнергии потребителю.



# Технические показатели парогенератора ПГН-200М

Поверхность нагрева испарителя, м <sup>2</sup>	2040 (255x8)
Поверхность нагрева пароперегревателя, м <sup>2</sup>	1168 (146x8)
Поверхность нагрева промперегревателя, м <sup>2</sup>	1792 (224x8)
Общая масса парогенератора в «сухом» состоянии, т	775
Общая масса парогенератора в рабочем состоянии, т	914

# Технические характеристики парогенератора ПГН-200М

Наименование параметра	Значение
1. Тепловая мощность, МВт	490
2. Расход натрия, кг/с	2030
3. Температура натрия, °С	
на входе (не выше)	518
на выходе	290-328
4. Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	84
5. Температура питательной воды, °С	241
6. Температура острого пара, °С (не выше)	507
7. Давление острого пара, МПа	13.7
8. Расход пара промежуточного перегрева, кг/с	55
9. Температура пара на входе в промпароперег-тель, °С	300
10. Темп-тура пара на выходе из промпаропрег-теля, °С	505
11. Темп-тура натрия на входе в испарит. модули ПГ, °С	500
12. Давление пара на входе в промпароперег-тель, МПа	2.74

# Краткие характеристики модулей

Наименование	ИСП	ОП	ПП
1. Диаметр и толщина стенки труб, мм	16x2.5	16x2.5	25x2.5
2. Длина труб, мм	15200	12720	12565
3. Количество теплообменных труб, шт.	369	239	235
4. Шаг труб в пучке по треугольнику, мм	28	33	33
5. Сечение межтрубного пространства, м <sup>2</sup>	0.187	0.197	0.125
6. Поверхность теплообмена по наружному диаметру, м <sup>2</sup>	255	146	224
7. Проходное сечение труб, м <sup>2</sup>			
8. Объем натрия, м <sup>3</sup>	0.0322	0.0227	0.0738
9. Объем воды (пара), м <sup>3</sup>	5.5	3.5	2.7
10. Масса в осушенном состоянии, т	0.66	0.5	1.7
	20.0	19.5	18.9

# Основные формулы теплового расчета ПГН-200М

1. 
$$Q_{isp} = D_1 \cdot c_{p1} \cdot (t'_1 - t''_1) \cdot \eta_{s.g} = D_2 \cdot (i'_2 - i_{2pv}) + D_2 \cdot r_2 + D_2 \cdot (i_{2pp} - i''_2)$$

2. 
$$D = \omega \cdot \rho \cdot f$$

3. 
$$Q_{isp} = F_{isp} \cdot k_{isp.sr} \cdot \Delta t_{log.isp.sr}$$

4. 
$$\Delta t_{log.sr} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{2.3 \cdot \log\left(\frac{\Delta t_b}{\Delta t_m}\right)}$$

# Основные формулы теплового расчета ПГН-200М

5.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_{ok}}{\lambda_{ok}} + \frac{s_{tr}}{\lambda_{tr}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

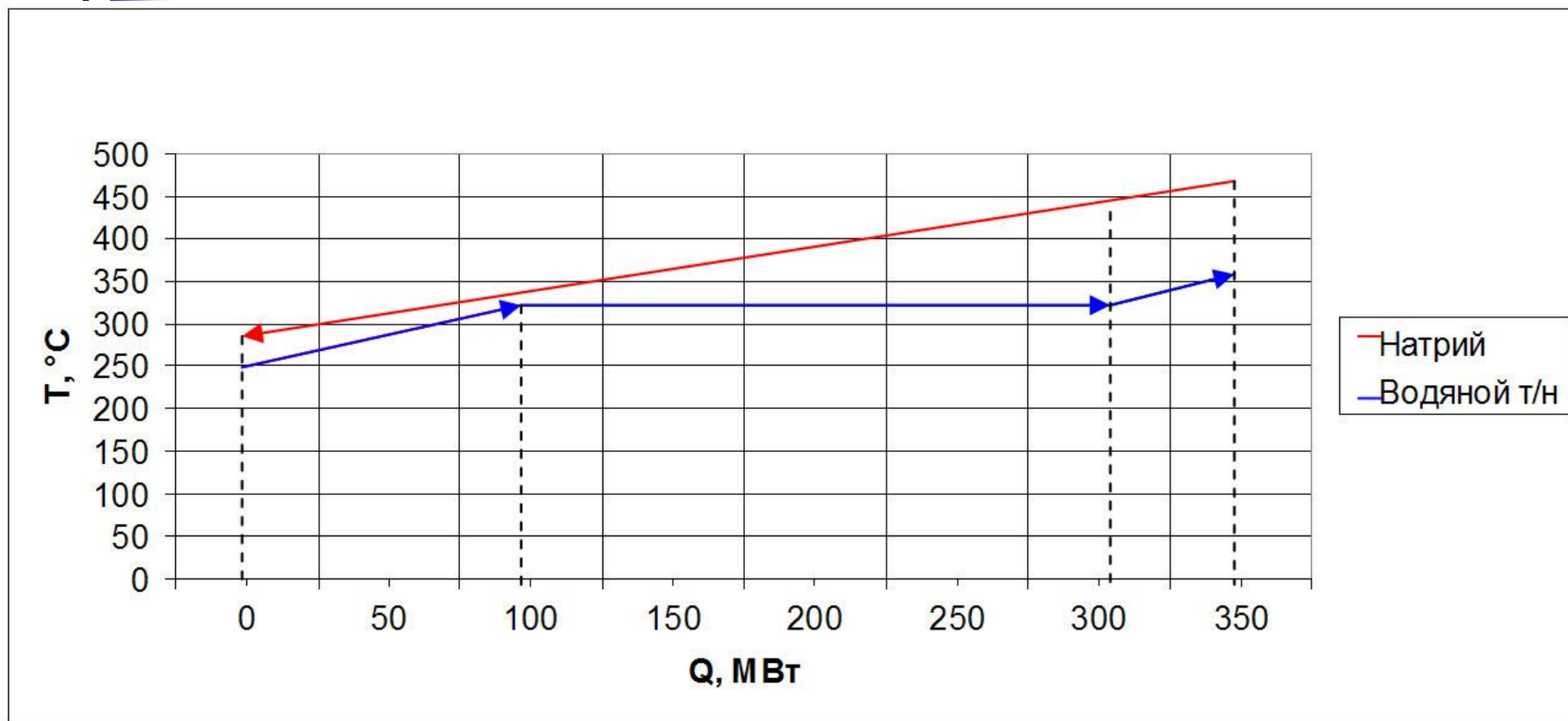
6.

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{ekv}}$$

7.

$$d_{ekv} = \frac{4F}{P}$$

# TQ – диаграмма испарительного модуля





# Теплообменники Na-Na для АЭС с реакторами БН

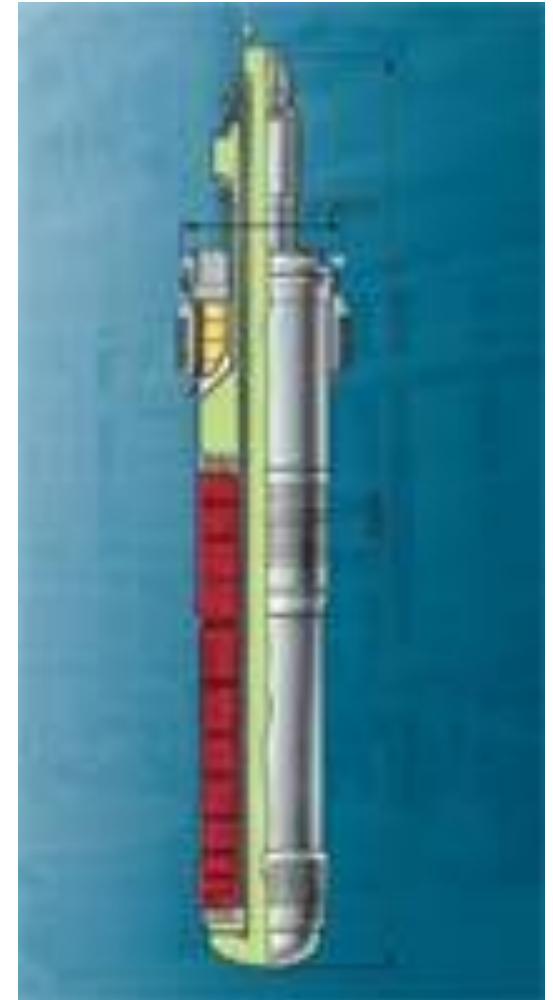
---

- Для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах наряду с парогенераторами ПГН-200М ключевым элементом 3-х контурной тепловой схемы является теплообменник Na-Na. Теплообменник Na-Na является составной частью реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем атомной паропроизводительной установки ОК-505 и предназначен для передачи в условиях реакторной установки тепла от циркулирующего в межтрубном пространстве теплоносителя (натрия) первого контура теплоносителю (натрию) второго (промежуточного) контура, циркулирующего внутри труб.



# Промежуточный ТА

- Тип теплообменника - вертикальный, кожухотрубный, с коаксиальным подводом и отводом теплоносителя второго контура, противоточный.
- Теплообменник состоит из трубной системы, напорной и сливной камер, центральной трубы, блока защиты, страховочного кожуха и деталей крепления.





# Промежуточный ТА

---

- Трубная система состоит из 2-х трубных досок, верхней и нижней, соединительной и профилирующей обечаек, теплообменных труб и стержней с деталями дистанционирования.
- Теплообменник, как промежуточный, обеспечивает надежность эксплуатации, радиационную безопасность, исключает попадание на турбину радиоактивных компонентов теплоносителя.



# Промежуточный ТА

---

- Теплообменник успешно отработал назначенный срок службы в составе реакторной установки Белоярской АЭС. По результатам обследования технического состояния срок службы теплообменника увеличен еще на 5 лет. Ведутся работы по продлению срока службы теплообменника до 40 лет.

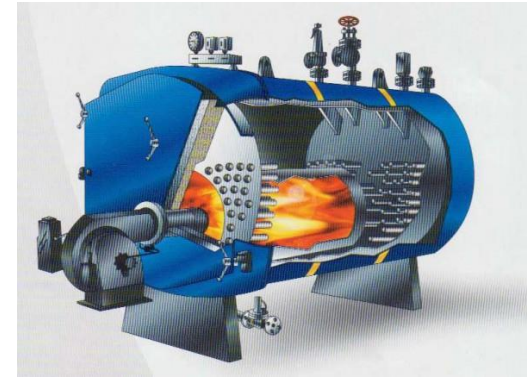
# Технические показатели ТА

## Na-Na

	<b>первый контур</b>	<b>второй контур</b>
Тепловая мощность, МВт	350	
Расход теплоносителя, кг/с	1111	1014
Давление расчетное, МПа	0,05	0,85
Номинальная температура теплоносителя, °С: на входе на выходе	550 377	328 518
Теплопередающая поверхность, м <sup>2</sup>	1647	
Масса теплообменника с учетом монтажных частей, т	72	

# Паровые котлы

Паровые котлы — специализированные котельные установки, предназначенные для производства насыщенного или перегретого пара. Могут использовать энергию топлива, сжигаемого в своих топках, электрическую энергию (электрический паровой котёл) или утилизировать теплоту, выделяющуюся в других установках (котлы-утилизаторы).



## Классификация по назначению:

- Энергетические паровые котлы — предназначены для производства пара, использующегося в паровых турбинах.
- Промышленные паровые котлы — вырабатывают пар для технологических нужд, так называемые «промышленные парогенераторы».
- Паровые котлы-утилизаторы — используют для получения пара вторичные энергетические ресурсы теплоту горячих газов, образующихся в технологическом цикле. Энергетические котлы-утилизаторы в составе ПГУ используют теплоту уходящих газов ПГУ.



# Паровые котлы

---

**Обозначения.** Согласно ГОСТ 3619-89, стационарные паровые котлы имеют следующую структуру обозначения:

## **Тип-D-P-T-ФОН**

### Тип

Пр — с принудительной циркуляцией (вода из барабана подаётся в испарительные поверхности специальными насосами);

Прп — с принудительной циркуляцией и промежуточным перегревом пара;

Е — с естественной циркуляцией (под действием разности плотностей воды и пара);

Еп — с естественной циркуляцией и промежуточным перегревом пара;

П — прямоточные;

Пп — прямоточные с промежуточным перегревом пара;

К — с комбинированной циркуляцией (в одних поверхностях естественная, в других принудительная);

Кп — с комбинированной циркуляцией и промежуточным перегревом пара.



# Паровые котлы

---

D – паропроизводительность котла, т/ч.

P – давление на выходе из котла, МПа (ранее часто указывалось в кгс/см<sup>2</sup>)

T – температура на выходе из котла, °С (для котлов, генерирующих насыщенный пар, не указывается). Если температура после промперегрева отличается от температуры первичного пара, она указывается через дробь.

F - вид топлива (если топка не слоевая):

К — каменный уголь и полуантрацит (тощий уголь);

А — антрацит, антрацитовый штыб (шлам);

Б — бурый уголь, лигниты;

С — сланцы;

М — мазут;

Г — природный газ;

О — отходы, мусор;

Д — другие виды топлива.



# Паровые котлы

---

**О** - тип топки (для газомазутных не указывают, кроме «В»):

**Т** — камерная топка с твердым шлакоудалением;

**Ж** — камерная топка с жидким шлакоудалением;

**Р** — слоевая топка (решетка);

**В** — вихревая топка;

**Ц** — циклонная топка;

**Ф** — топка с кипящим (флюидизированным) слоем (стационарным и циркулирующим);

**И** — иные виды топок, в том числе двухзонные.

**Н** – если котёл под наддувом.

Параметры котла по возможности подбираются по стандартному ряду.

После обозначения по ГОСТ может писаться в скобках заводская марка, например,

Е-75-3,9-440БТ (БКЗ-75-39ФБ).