

ПАРОГЕНЕРАТОРЫ АЭС

Тема. ПГ в тепловой схеме АЭС

Основные вопросы

- ▶ Понятие парогенератора, теплоносителя и рабочего тела
- ▶ Принципиальные схемы генерации пара на АЭС.
- ▶ Сравнительные достоинства и недостатки

Понятие парогенератора

Теплообменный аппарат, производящий во втором (третьем) контуре нерадиоактивный пар за счет теплоты первичного теплоносителя.

Примечание. Парогенератор АЭС – *steam plant* (англ.)

Понятие теплоносителя и рабочего тела

- ▶ **Теплоноситель** – среда, проходящая через активную зону реактора и используемая для отвода тепла от ТВЭЛОВ (*среда, отдающая в ПГ тепло*)
- ▶ **Рабочее тело** - среда, совершающая работу, с преобразованием тепловой энергии в механическую (*среда, принимающая в ПГ тепло и изменяющая свое агрегатное состояние*)

Принципиальные схемы генерации пара на АЭС

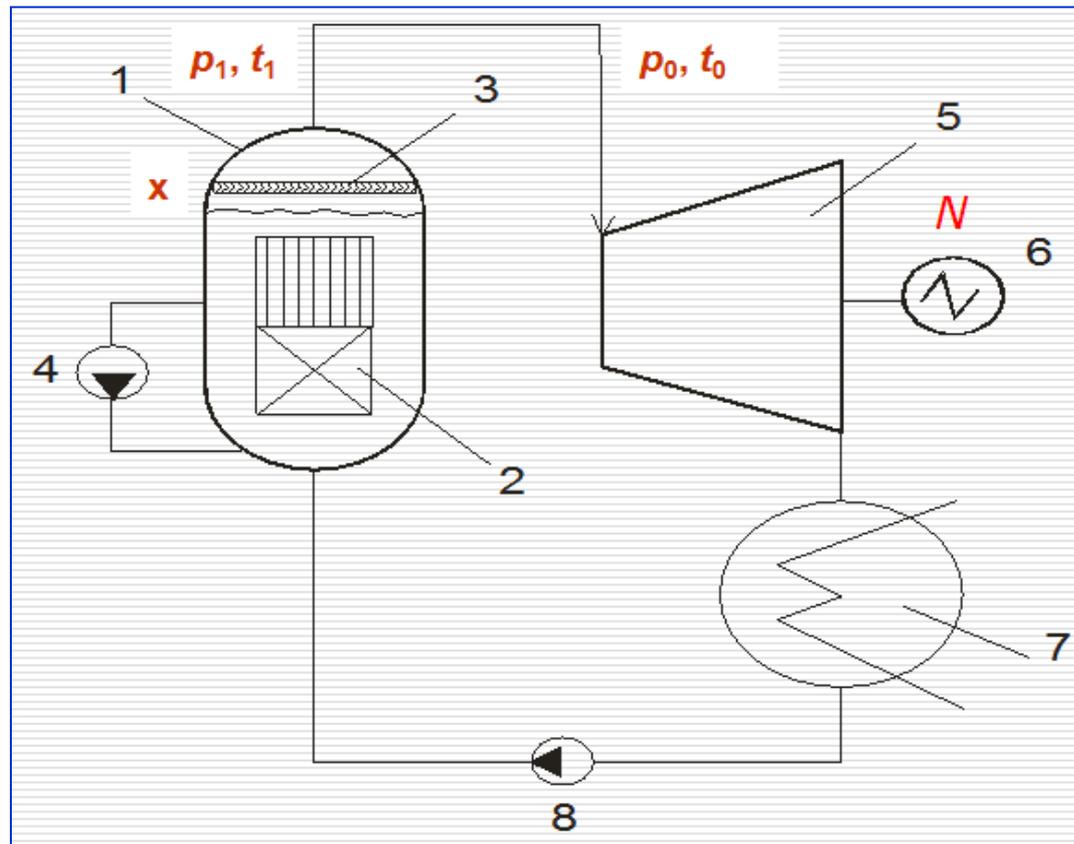
- одноконтурные (теплоноситель одновременно является рабочим телом);
- многоконтурные (2-х и 3-х контурные)

Типы одноконтурных схем

1. Схема энергоблока АЭС с водо-водяным реактором кипящего типа (**ВК**, **BWR**);
2. Схема энергоблока АЭС с водографитовым реактором кипящего типа (**РБМК**);
3. Схема энергоблока АЭС с канальным ядерным перегревом пара в водографитовом реакторе (**АМБ**)

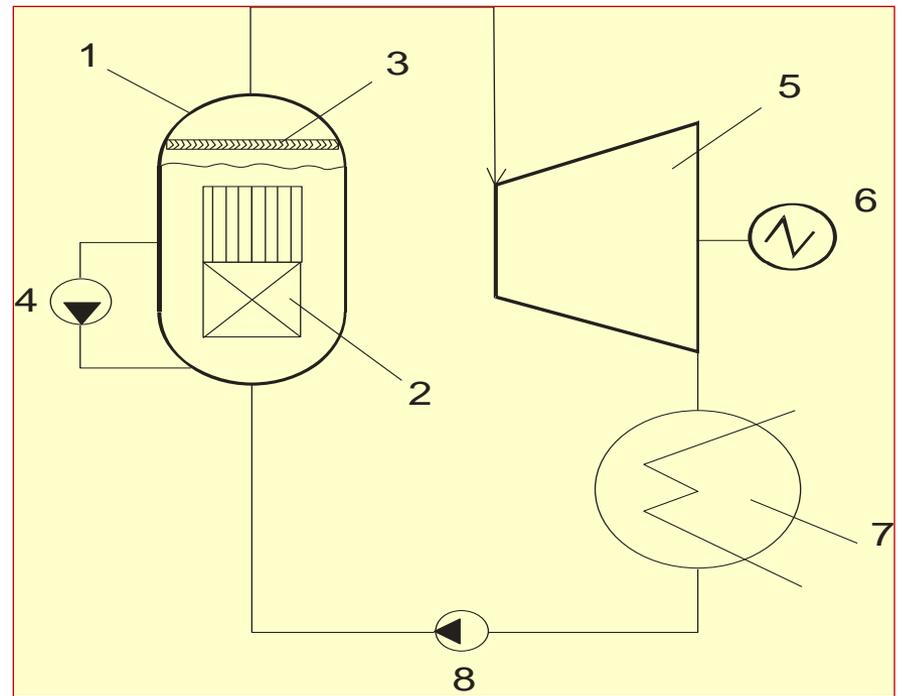
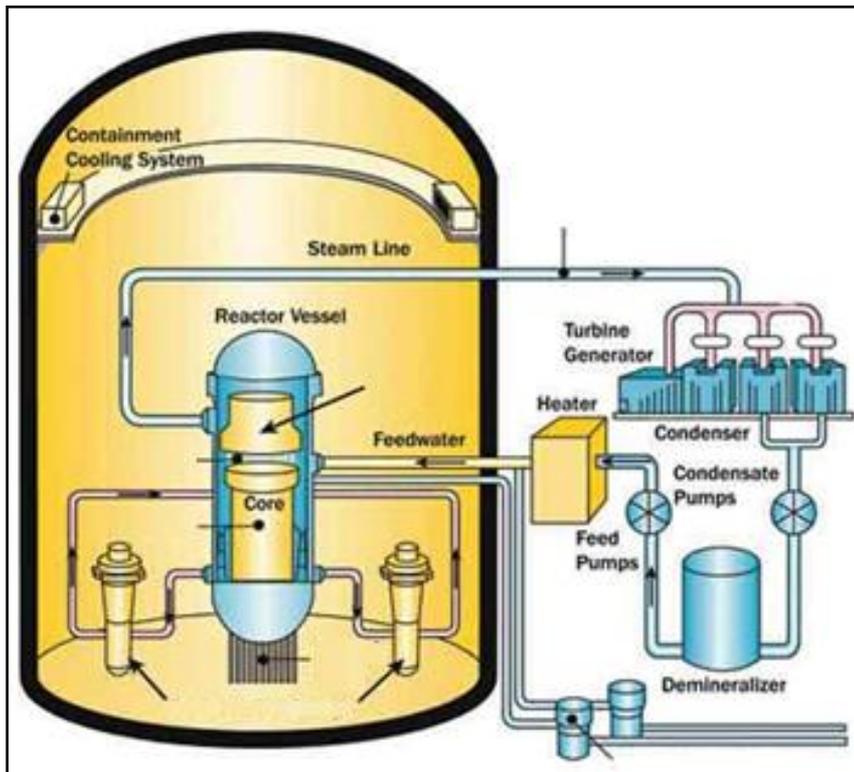
Примечание. *BWR* – *boiling water reactor* (англ.)

Схема с водо-водяным реактором кипящего типа (ВВР)

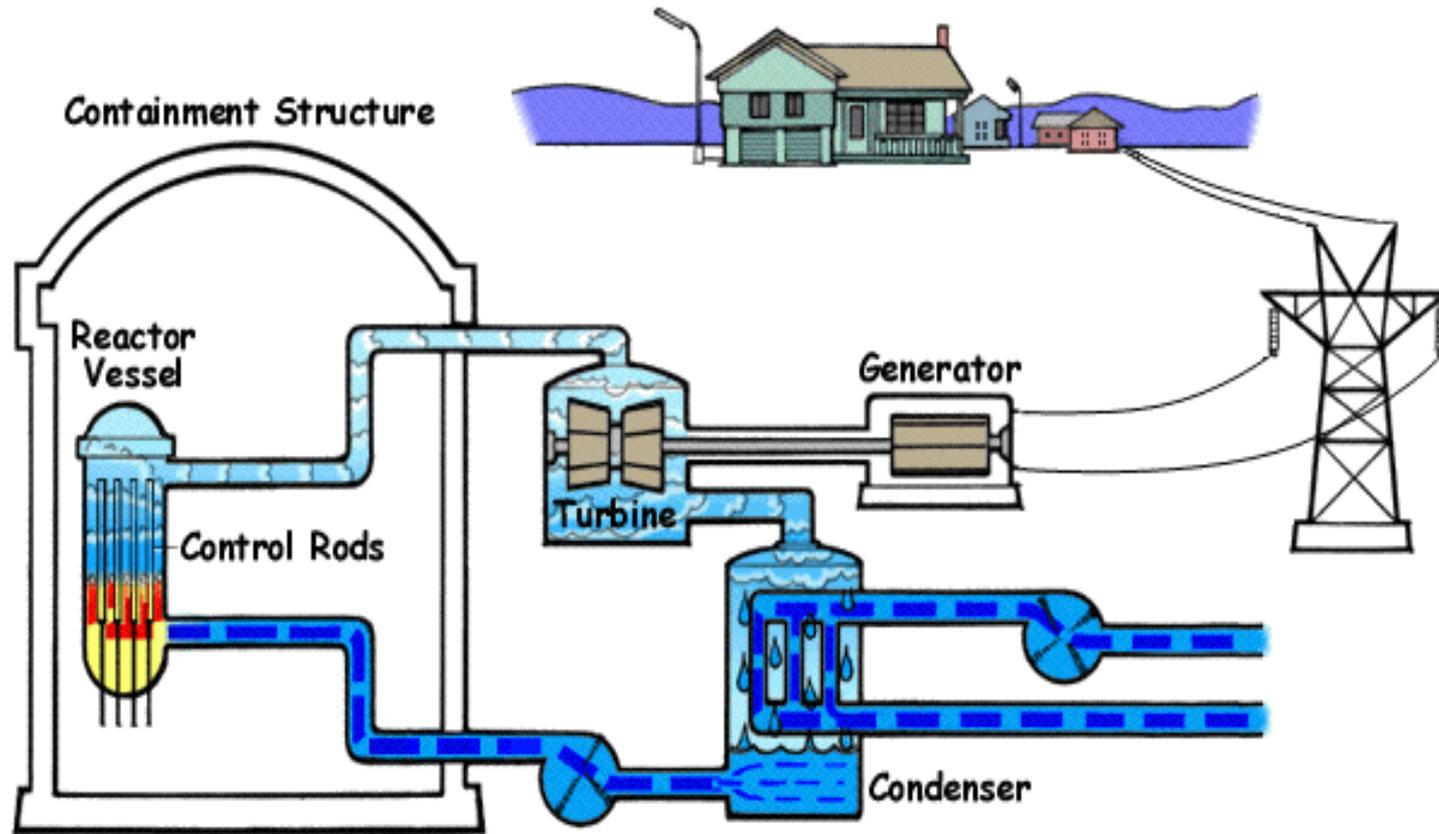


Примечание. Первый энергоблок ВВР: 207 МВт, 1969 г., АЭС «Дрезден»

Схема с водо-водяным реактором кипящего типа (ВВР)



АЭС с водо-водяным реактором кипящего типа (ВВР)



Характеристики типового энергоблока ВВР

- ▶ Тепловая мощность $Q = 3579$ МВт;
- ▶ Электрическая мощность $N = 1250$ МВт;
- ▶ Параметры теплоносителя на выходе из реактора:
 - давление $P_1 \approx P_0 = 7$ МПа;
 - температура $T_1 \approx T_0 = T_{\text{НАС}}$;
 - степень сухости $0,1 < x < 0,4$

Схема с водографитовым реактором кипящего типа (РБМК)

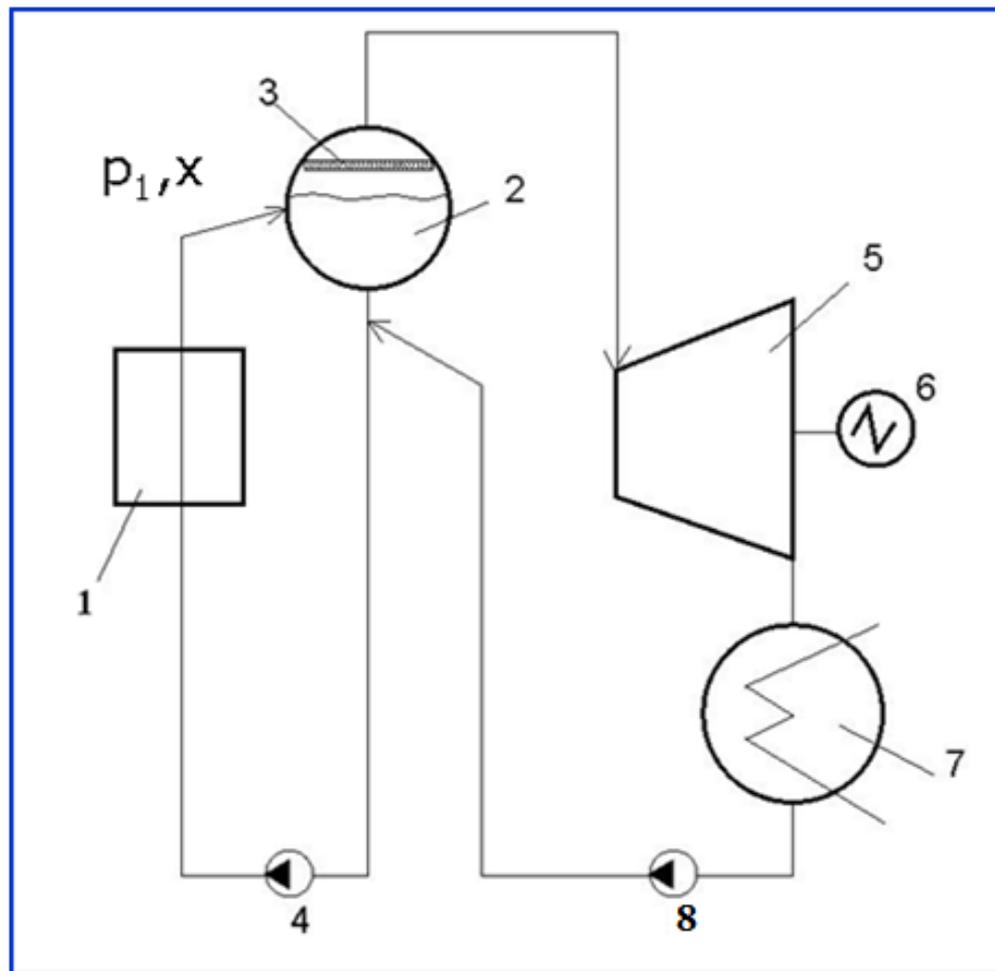
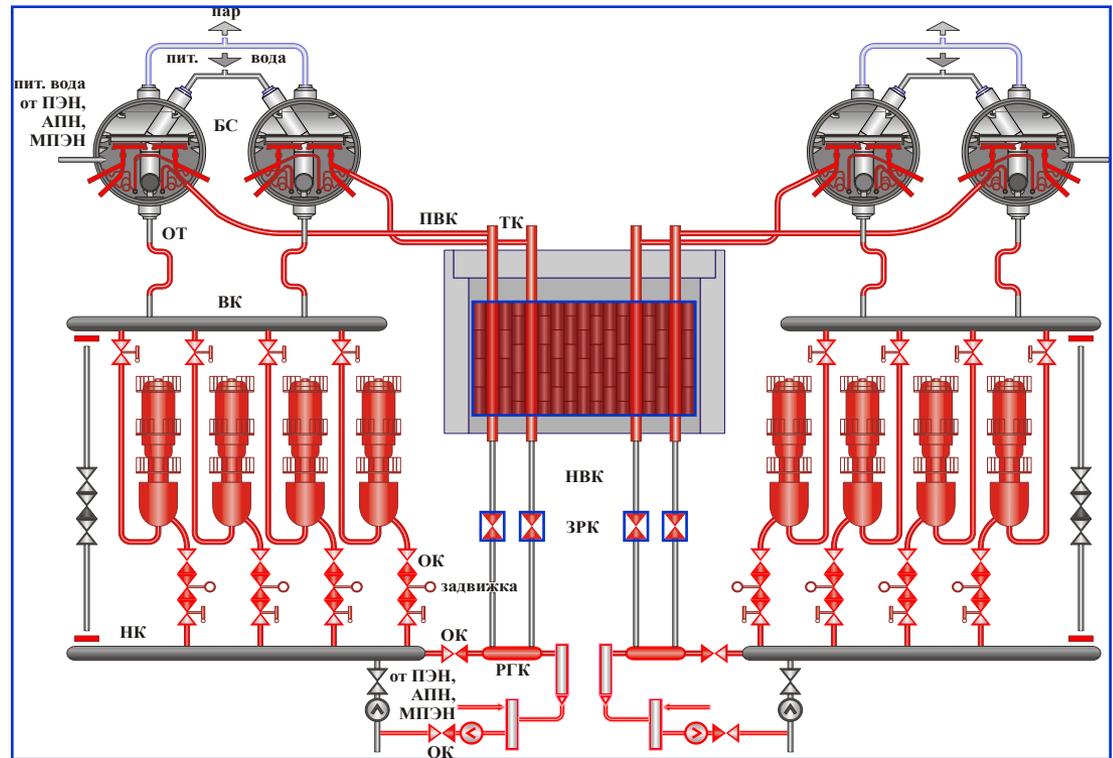
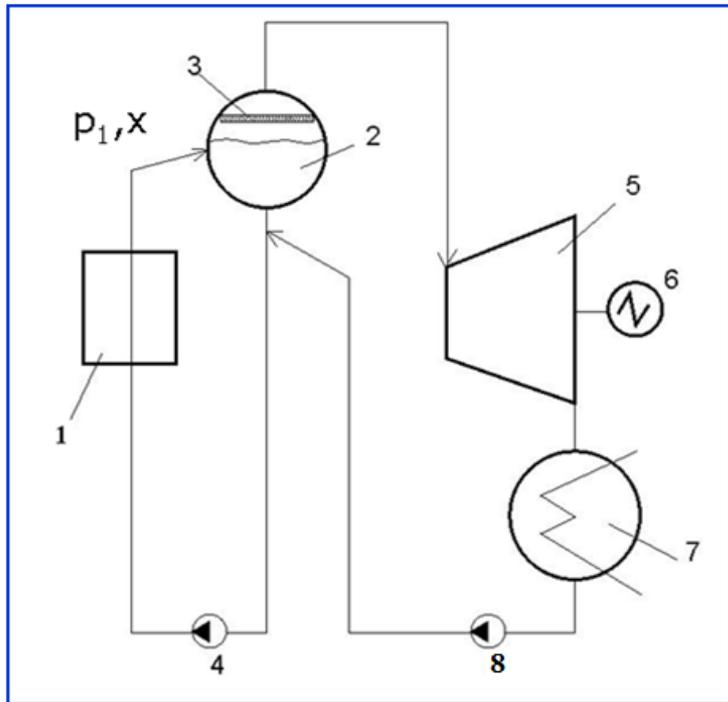
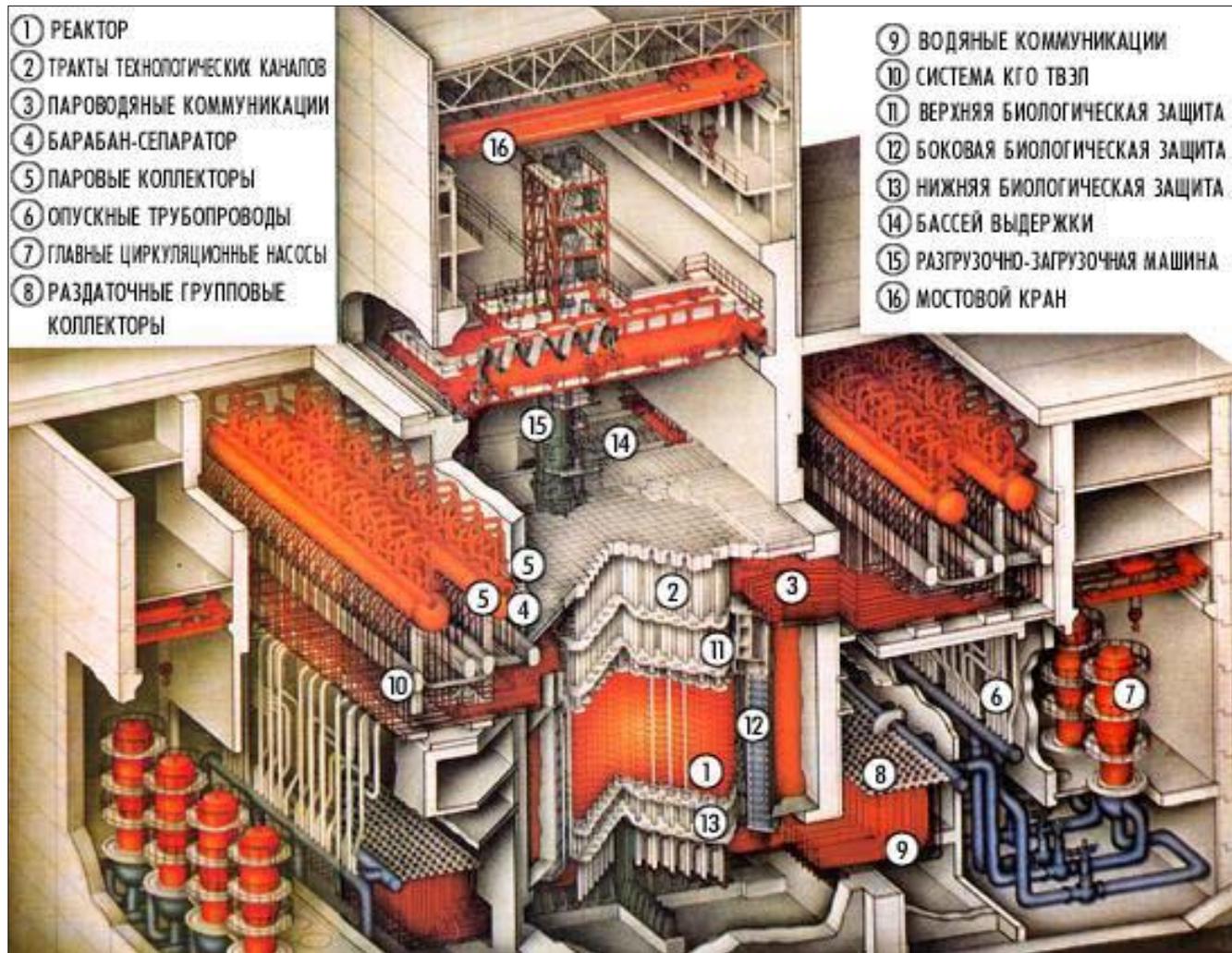


Схема с водографитовым реактором кипящего типа (РБМК)



Компоновка оборудования реакторной установки РБМК-1000



Характеристики энергоблока типа РБМК-1000

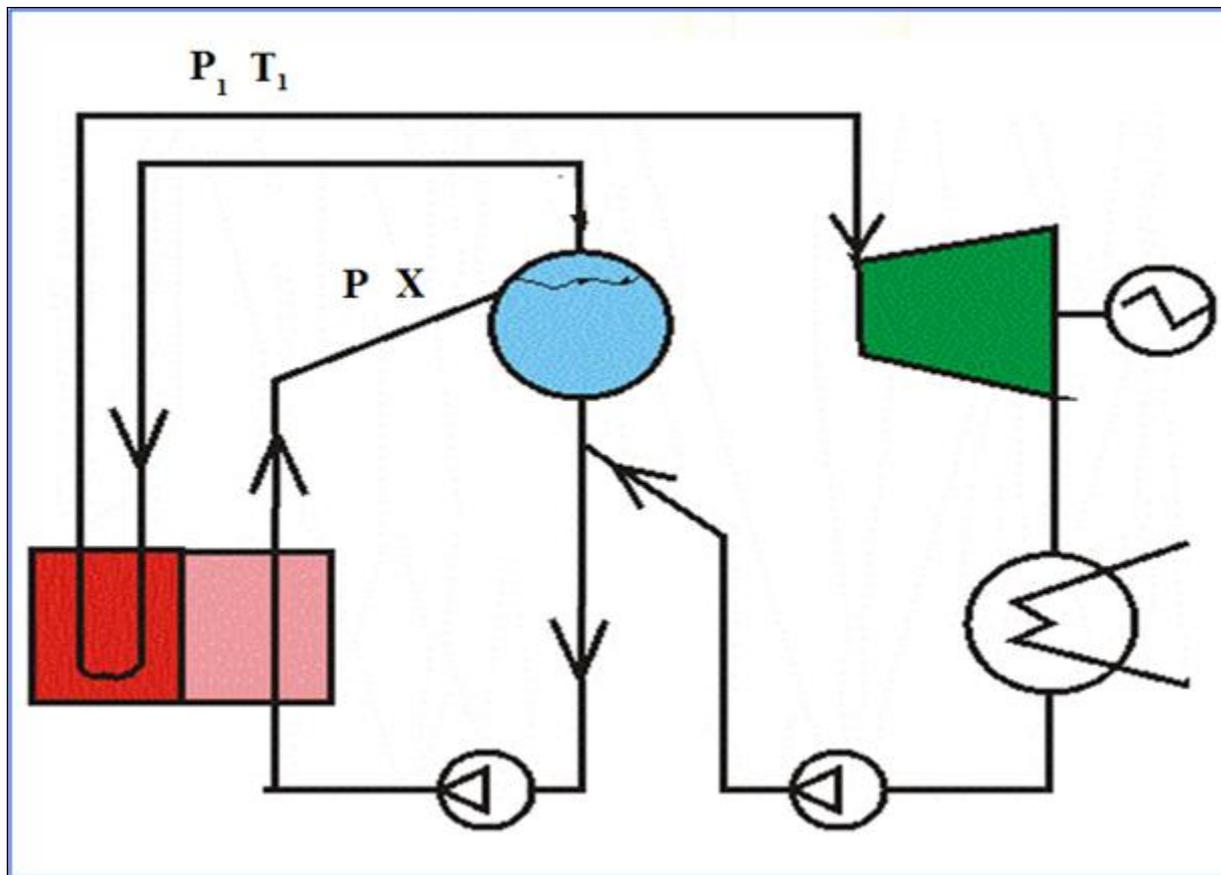
- ▶ Тепловая мощность $Q = 3200$ МВт;
- ▶ Электрическая мощность $N = 1000$ МВт;
- ▶ Параметры теплоносителя на выходе из реактора:
 - давление $P_1 = 7,4$ МПа;
 - температура $T_1 = T_{НАС}$;
 - степень сухости $X = 0,15$

Достоинства и недостатки схем с реакторами кипящего типа

- Более простая тепловая схема;
- отсутствие сложных и металлоемких ПГ, КД;
- повышение безопасности реакторной установки (меньшее давление теплоносителя по сравнению с PWR)

- возможность выноса радиоактивности в ПТУ;
- усложнение конструкции реактора (большие по сравнению с PWR размеры реактора);
- более жесткие требования к ВХР;
- плохие динамические свойства (паровой эффект, отсутствие ПГ)

Схема с ядерным перегревом пара в водографитовом реакторе (АМБ)



Характеристики энергоблока типа АМБ-200

- ▶ Тепловая мощность $Q = 530$ МВт;
- ▶ Электрическая мощность $N = 200$ МВт;
- ▶ Параметры теплоносителя на выходе из испарительных каналов реактора:
 - давление $P = 9,5$ МПа;
 - степень сухости $X = 0,15$
- ▶ Параметры теплоносителя на выходе из пароперегревательных каналов реактора:
 - давление $P_1 = 9,0$ МПа;
 - температура $T_1 = \text{до } 545$ °С

Достоинства и недостатки схемы с ядерным перегревом пара

- Высокая тепловая экономичность установки (перегретый пар).
- Низкий уровень активности рабочего тела

- Усложнение конструкции реактора (каналы 2-х типов).
- Ухудшение нейтронно-физического баланса (нержавеющая сталь)

Типы двухконтурных схем

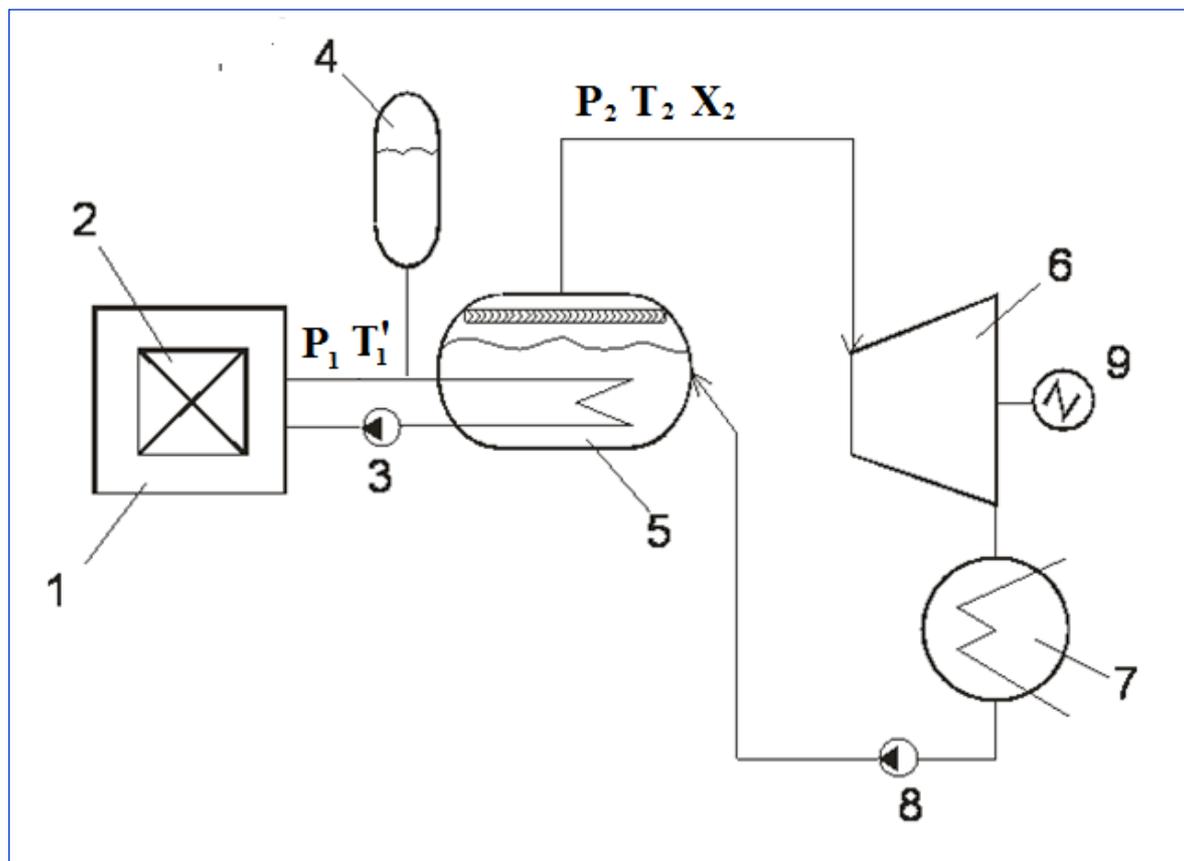
1. Схема энергоблока АЭС с водо-водяным реактором некипящего типа (**ВВЭР**, **PWR**, **CANDU** и др.);
2. Схема энергоблока АЭС с газоохлаждаемым реактором (**ВГ**, **ВГР**, **AGR**, **THTR**, **HTGR** и др.);

Примечание.

PWR – pressurized water reactor

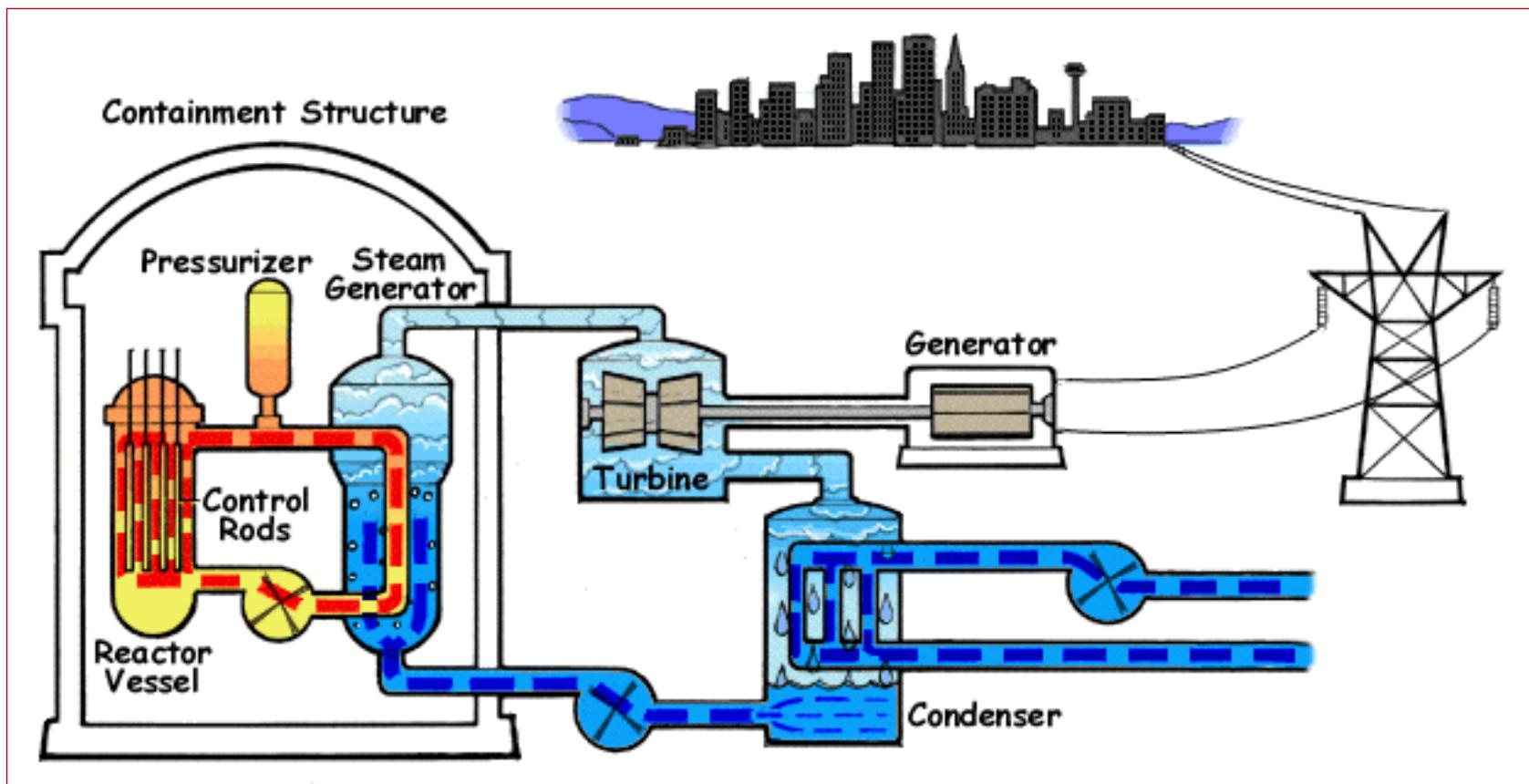
CANDU – Canada Deuterium-Uranium (reactor)

Схема с водо-водяным реактором некипящего типа (ВВЭР, BWR)

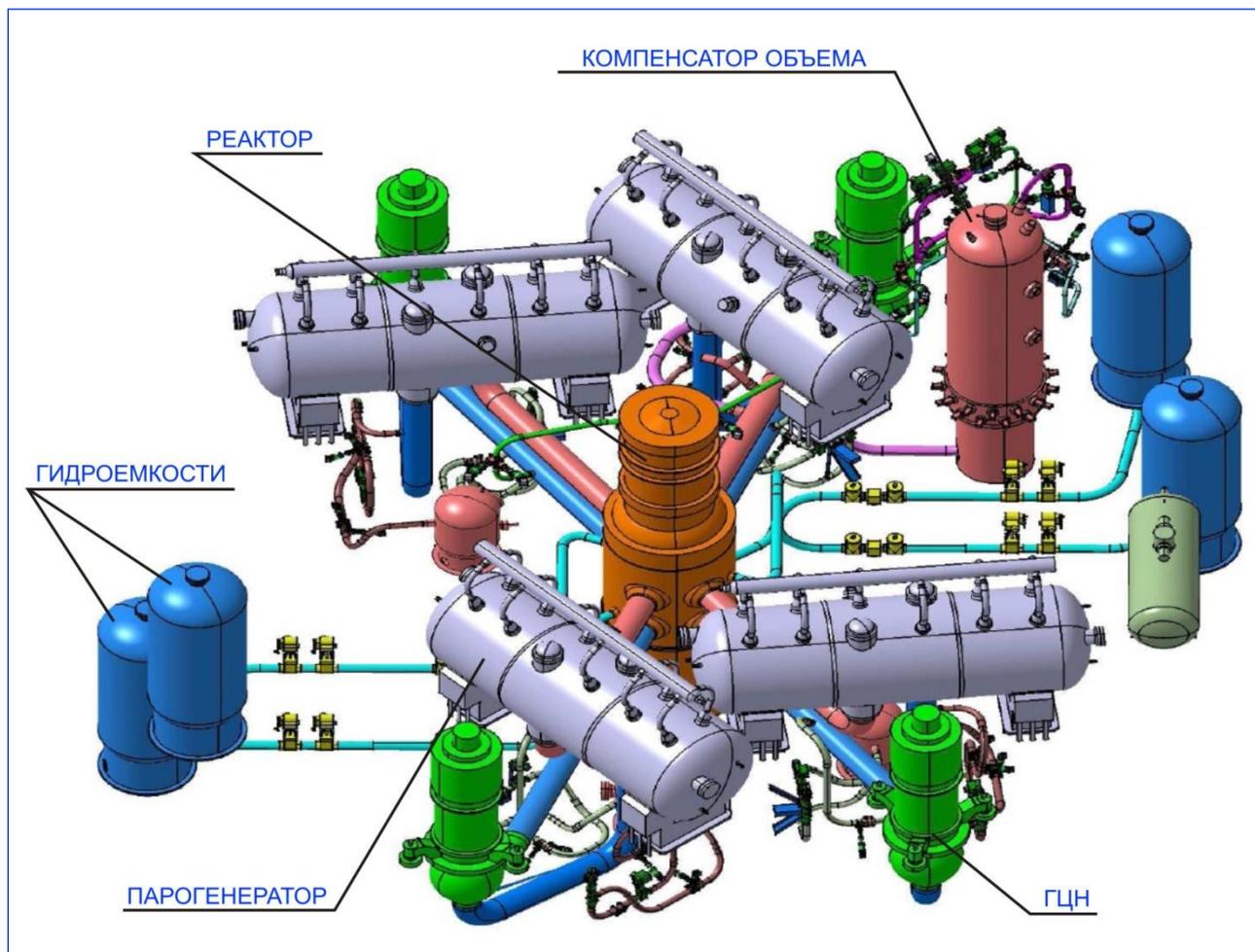


Примечание. Первый энергоблок PWR: 68 МВт, 1958 г., АЭС «Шиппингпорт», США

АЭС с водо-водяным реактором некипящего типа (ВВЭР, PWR)



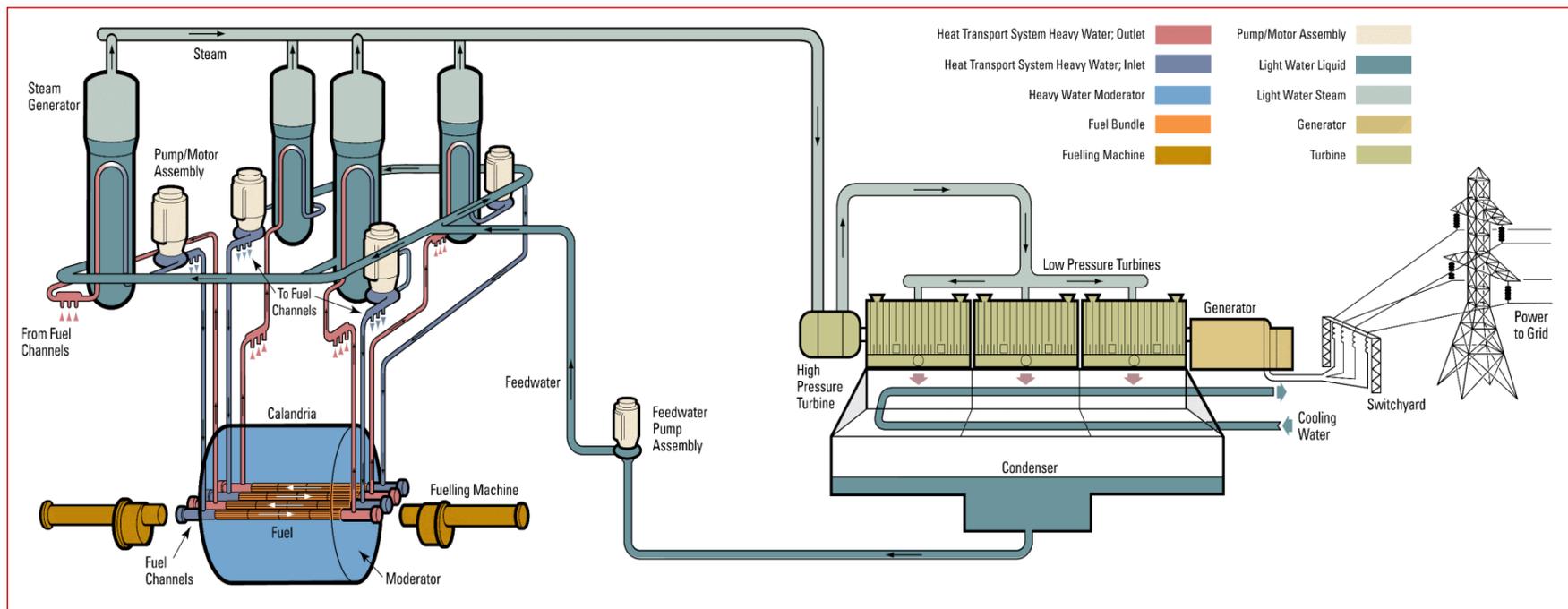
Компоновка оборудования 1-го контура энергоблока ВВЭР-1000



Характеристики энергоблока типа ВВЭР-1000

- ▶ Тепловая мощность $Q = 3000$ МВт;
- ▶ Электрическая мощность $N = 1000$ МВт;
- ▶ Параметры теплоносителя на выходе из реактора:
 - давление $P_1 = 16$ МПа;
 - температура $T'_1 = 320$ °С;
- ▶ Параметры рабочего тела на выходе из ПГ:
 - давление $P_2 = 6,27$ МПа;
 - температура $T_2 = T_{\text{НАС}}$;
 - степень сухости $X_2 = 1$

Принципиальная схема энергоблока с реактором CANDU



На сегодня в 7 странах эксплуатируются 44 ядерные энергоблока с реакторами CANDU, еще 4 блока - строятся. Они занимают третье место в мире после реакторов PWR и а BWR.

Примечание. Первый энергоблок PWR: 25 МВт, 1962 г., АЭС «Ролфтом», США

Достоинства и недостатки двухконтурных схем с реакторами некипящего типа

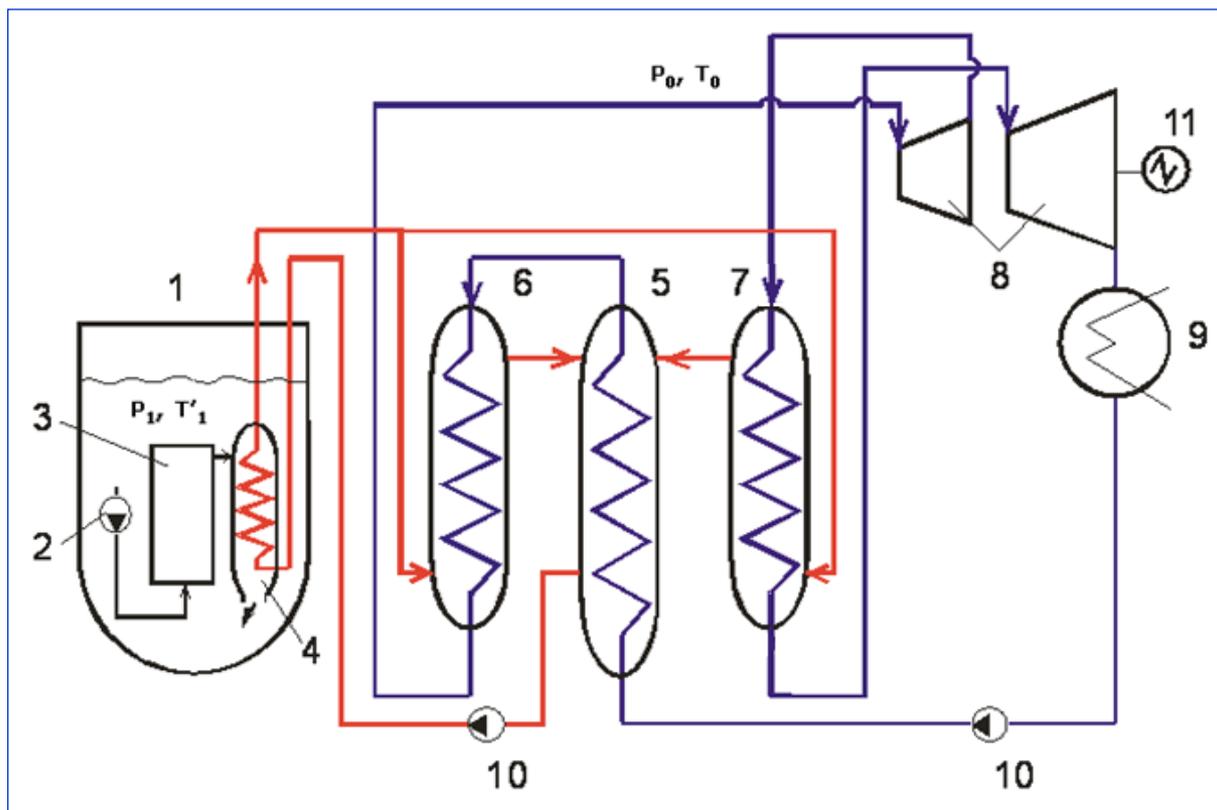
- Отсутствует вынос радиоактивности в ПТУ.
- Хорошие динамические свойства (ПГ как буферная емкость).
- Относительно невысокие требования к ВХР.

- Усложнение и удорожание схемы (ПГ, КД).
- Низкая тепловая экономичность.
- Нетехнологичность изготовления оборудования ЯППУ (корпус реактора, ПГ)

Типы трехконтурных схем

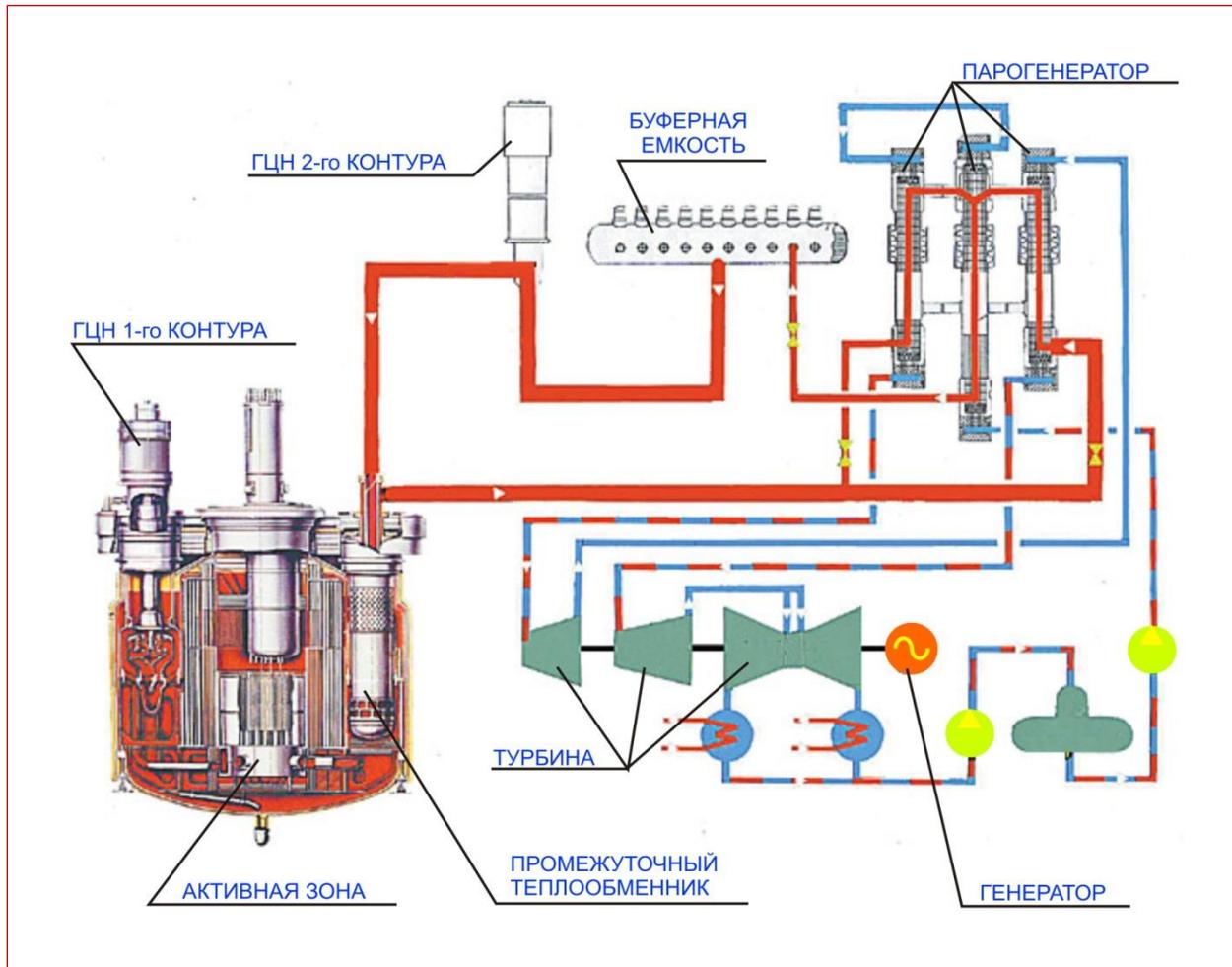
1. Схема энергоблока АЭС с реактором на быстрых нейтронах, охлаждаемого ЖМТ (БН);

Схема энергоблока с реактором БН-600

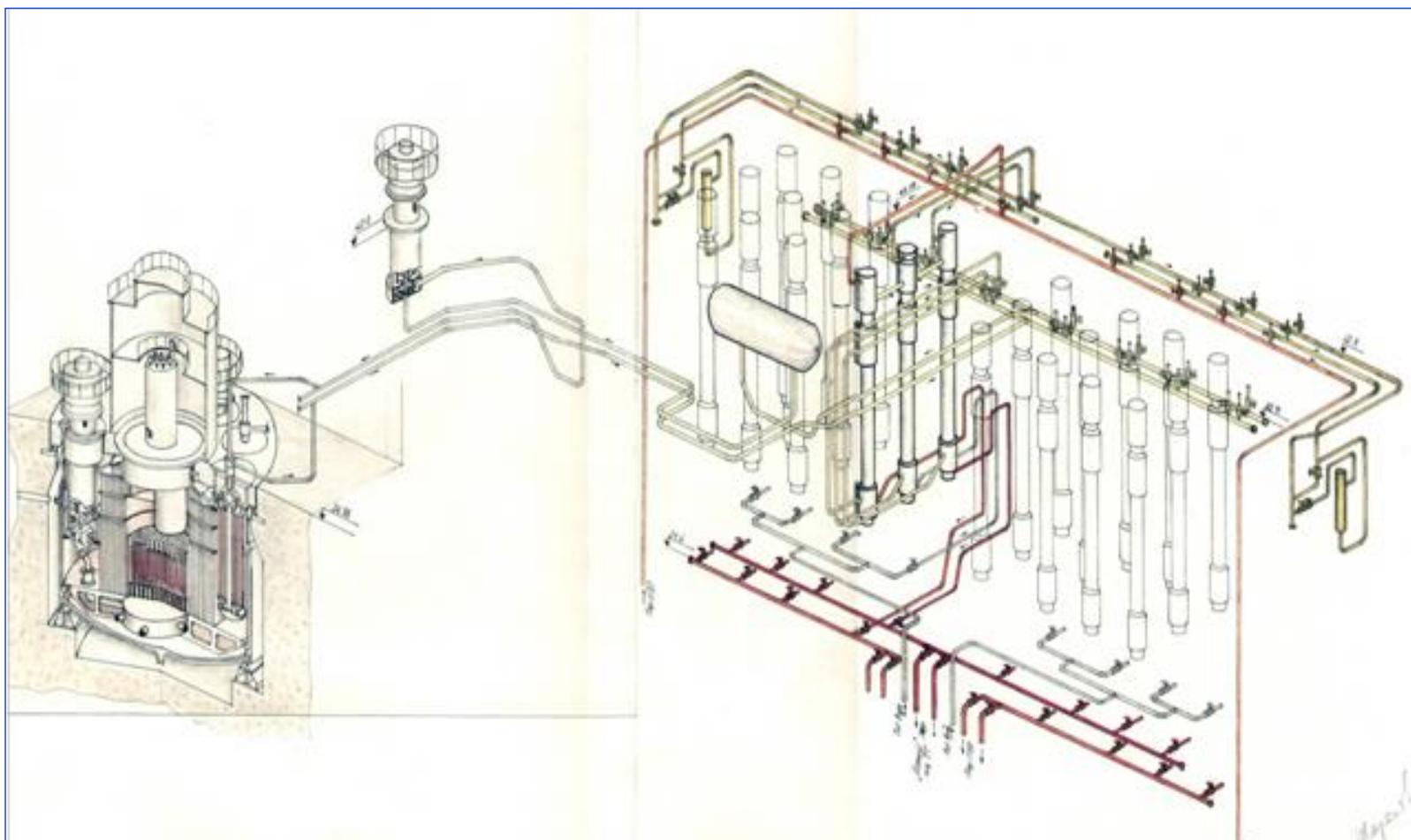


Примечание. Первый энергоблок FBR: 90 МВт, 1973 г., АЭС «Шевченковская АЭС»

Схема энергоблока с реактором БН-600



Компоновка оборудования энергоблока БН-600



Характеристики энергоблока типа БН-600

- ▶ Тепловая мощность $Q = 1500$ МВт.
- ▶ Электрическая мощность $N = 600$ МВт.
- ▶ Параметры **теплоносителя** на выходе из реактора:
 - давление $P_1 = 0,1 - 0,2$ МПа;
 - температура $T'_1 = 560$ °С.
- ▶ Параметры пара (**рабочего тела**) на входе в турбину:
 - давление $P_0 = 13,7$ МПа;
 - температура $T_0 = 505$ °С

Достоинства и недостатки трехконтурной схемы с реактором типа БН

- Хорошая тепловая экономичность установки (высокий КПД).
- Отсутствие радиоактивности в турбине

- Сложность и дороговизна технологической схемы (3 контура).
- Сложность эксплуатации ЯППУ (ЖМТ).
- Наличие промежуточного теплообменника и парогенератора

Спасибо за внимание !