

ЦИКЛЫ ПТУ АЭС ВЫБОР НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА

СОДЕРЖАНИЕ

- Базовые уравнения теплопередачи
- Циклы Карно и Ренкина на насыщенном паре
- Выбор начальных параметров пара на АЭС
- Теплоносители АЭС
- Парогенераторы АЭС, конструктивные схемы парогенераторов АЭС
- Циклы АЭС на перегретом паре
- Сепарация и перегрев пара на АЭС

ЛИТЕРАТУРА ПО ТЕМЕ ЛЕКЦИИ

1. Рассохин, Николай Георгиевич. Парогенераторные установки атомных электростанций : учебник / Н. Г. Рассохин. — Москва : Энергоатомиздат, 1987. — 384 с.: ил. — (Для студентов вузов). — Библиогр.: с. 379-380. — Алф. предм. указ.: с. 381-382.
2. Федоров, Леонид Факеевич. Парогенераторы атомных электростанций / Л. Ф. Федоров, В. Ф. Титов, Н. Г. Рассохин. — Москва : Энергоатомиздат, 1992. — 412,[2] с.: ил.: 21 см. — Библиогр.: с. 408-411. (85 назв.). — ISBN 5-283-03821-1.
3. Ташлыков О. Л. Парогенераторы АЭС : учебник : Рекомендовано методическим советом Уральского федерального университета для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» / О. Л. Ташлыков, А. И. Бельтюков ; научный редактор С. Е. Щеклеин ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцин. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. — 304 с. — (Учебник УрФУ). — ISBN 978-5-7996-2675-4.

БАЗОВЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Уравнение теплового баланса

$$Q = G \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = D \cdot (h_2 - h_1) = k \cdot F \cdot \overline{\Delta T}$$

Уравнение коэффициента теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Уравнение толщины стенки сосуда под давлением

$$\delta_d = \frac{p_d \cdot d_{in}}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{0.2}] - p_d)} + C; \quad \delta_d = \frac{p_d \cdot d_{out}}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{0.2}] + p_d)} + C$$

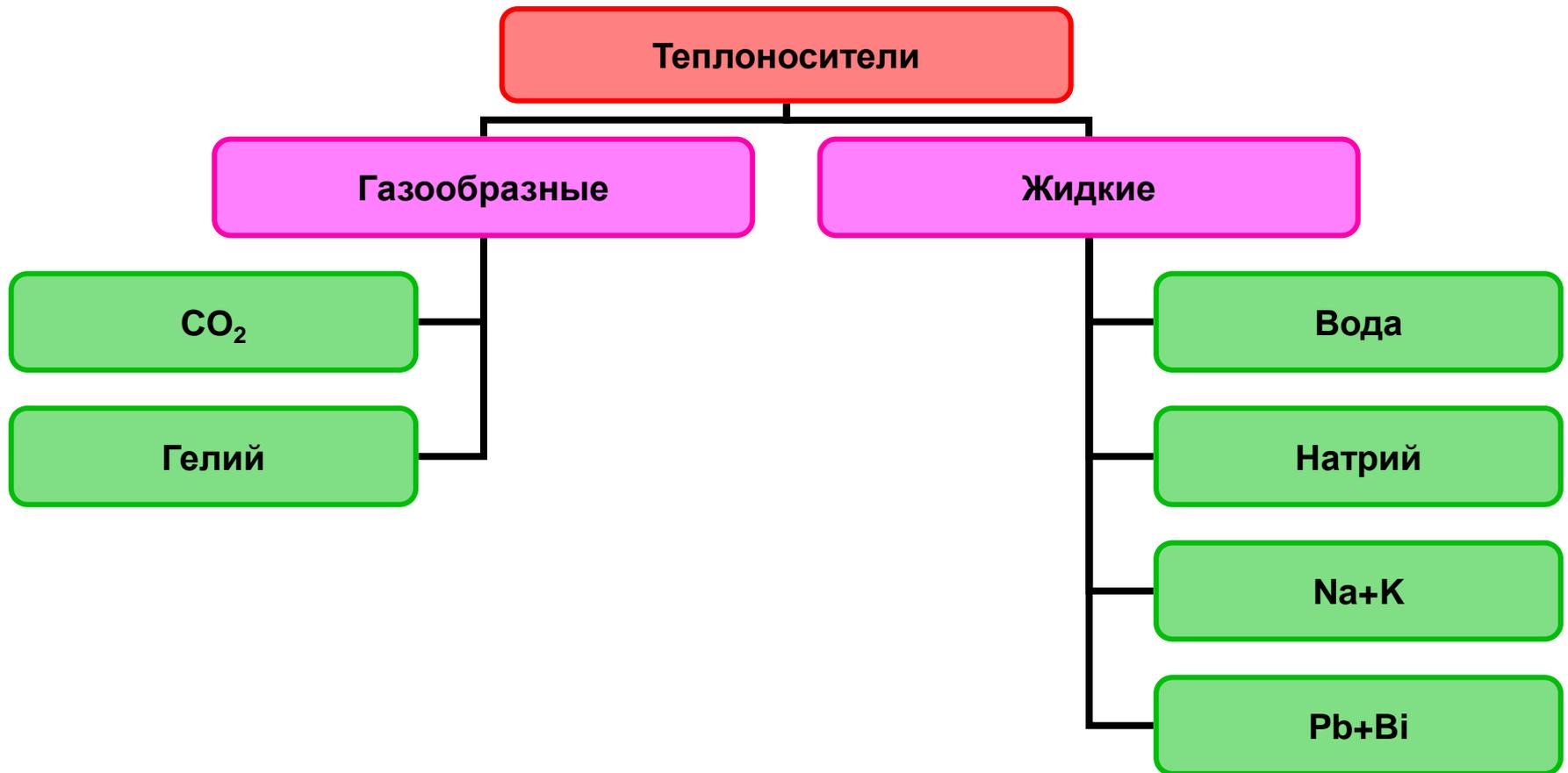
НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА

**Начальные параметры пара зависят от 2х
основных факторов:**

1. Типа теплоносителя.
2. Конструктивных характеристик парогенератора.

Естественным ограничением является только критическое давления пара.

ТИПЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ АЭС



ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМ

1. Требования в отношении ядерно-физических свойств (малое сечение захвата, радиационная устойчивость);
2. Требования в отношении теплофизических свойств (высокие теплопроводность и теплоемкость, низкая вязкость);
3. Требования в отношении коррозионно-эрозионных свойств (минимальное коррозионное и эрозионное воздействие на конструкционные материалы);
4. Требования в отношении эксплуатационных свойств (термическая стойкость, низкая химическая активность, нетоксичность, доступность, низкая стоимость и др.)

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Свойство	Газовые теплоносители		Жидкие теплоносители	
	CO ₂	He	вода	Na
t _{пл} , °C			0	98
t _{кип} , °C			100	883
ρ, кг/м ³	~20	~3,7	640	805
Сечение захвата, б	0,003	0,001	0,6	0,5
λ, Вт/(м °C)	0,04	0,4	0,55	70
c _р , кДж/(кг °C)	1,06	5,2	5,8	1,27
Относительная мощность на прокачку	3...4	3...4	1	1,05
Область применения:				
- давление, МПа;	2...3	5...10	до 17	1...3
- макс. температура, °C	500	1000	335	600

ДААННЫЕ ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

ТПУ-ЭНИИ-АТЭС

Зависимость теплопроводности
теплоносителей от температуры

ДААННЫЕ ПО ТЕПЛОЕМКОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Теплоемкость основных
теплоносителей ЯЭУ

Вода



ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ВОДЫ

Достоинства:

- ✓дешевизна, распространенность;
- ✓хорошие теплофизические свойства;
- ✓неплохие ядерно-физические свойства;
- ✓Термическая, радиационная стабильность

Недостатки:

- ✓ сравнительно низкая температура кипения;
- ✓ существенная зависимость плотности от температуры;
- ✓ большая коррозионная активность

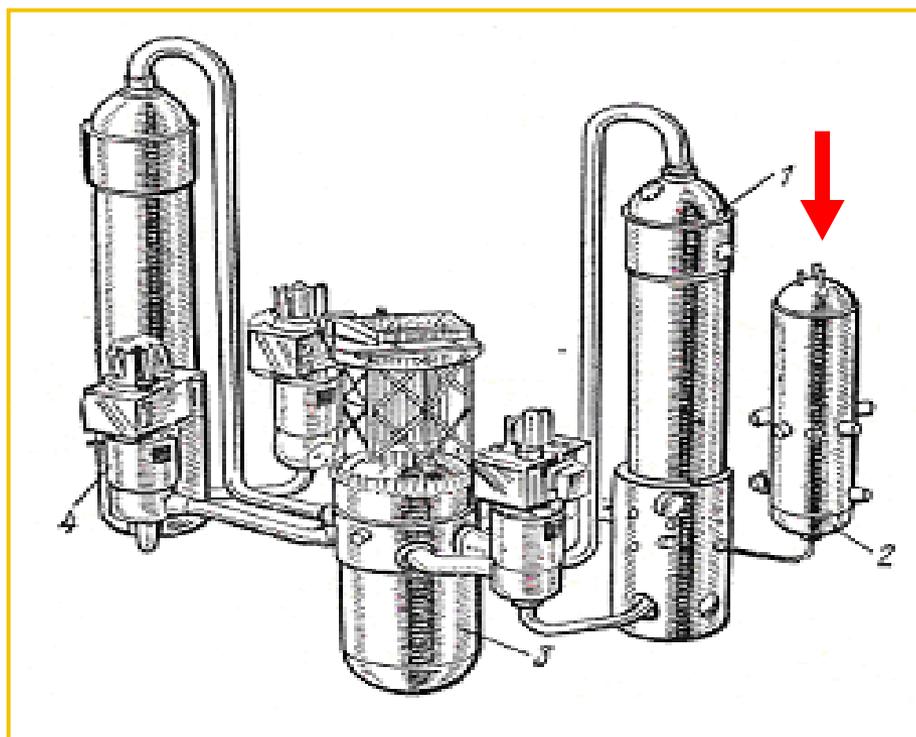
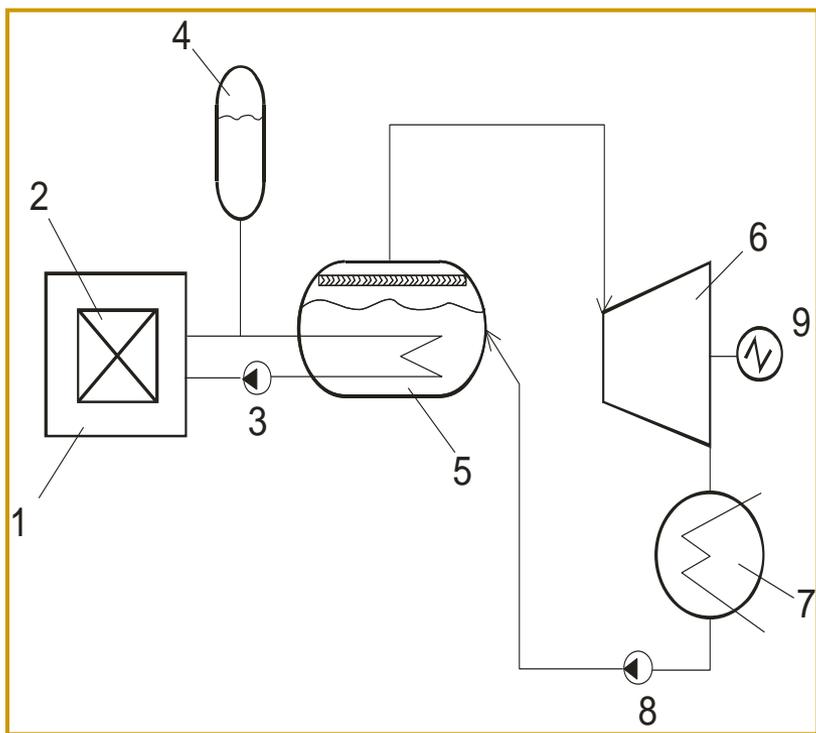
ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ - ОСНОВНОЙ НЕДОСТАТОК ВОДЫ КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

$P=16 \text{ МПа}$; $t=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\rho=653,4 \text{ кг/м}^3$;

$P=16 \text{ МПа}$; $t=330 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\rho=1005,4 \text{ кг/м}^3$.



Изменение плотности $> 30\%$. В блоках ВВЭР (PWR) требуется КД



КОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ВОДЫ

Нормируют (ограничивают) следующие показатели контурной воды:

- 1) солесодержание;
- 2) значение pH;
- 3) содержание кислорода;
- 4) жесткость;
- 5) содержание хлоридов;
- 6) содержание продуктов коррозии и т.д.

Присутствие кислорода, щелочи, хлоридов и др. в воде увеличивает ее агрессивность относительно конструкционных материалов.

Наличие в воде соединений меди, магния, кальция и продуктов коррозии железа приводит к образованию отложений на поверхности теплообменных труб ПГ

ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ

Водородный показатель характеризует концентрацию свободных ионов водорода в воде.

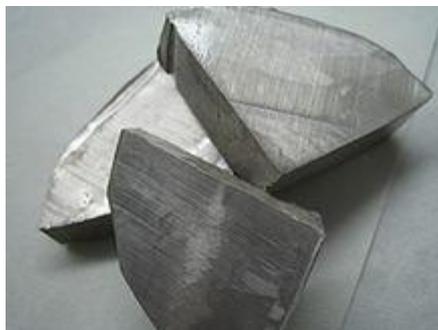
Этот показатель называется рН и представляет собой логарифм концентрации ионов водорода, взятый с обратным знаком, т.е. $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$.

В чистой воде $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ моль/л, тогда $\text{pH}=7$.

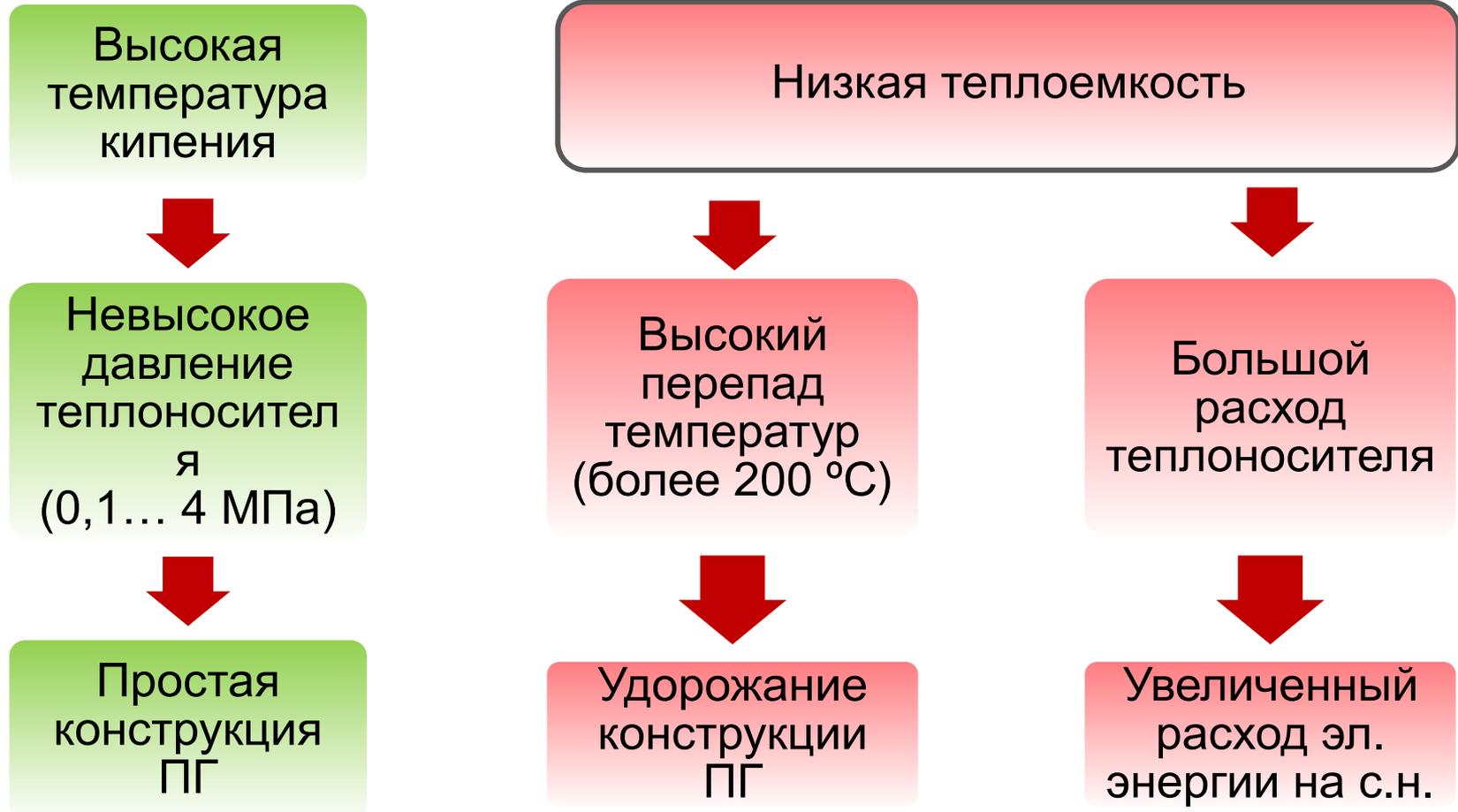
Пониженное содержание свободных ионов водорода H^+ по сравнению с ионами OH^- ... вода имеет щелочную реакцию ($\text{pH}>7$).

Повышенное содержания ионов H^+ ... вода имеет кислую реакцию ($\text{pH}<7$)

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСК ИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ



ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ



ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ НА

Достоинства:

- ✓ хорошие ТФС (большая λ , низкая μ ; высокая $T_{\text{кип}}$);
- ✓ неплохие ядерно-физические свойства;
- ✓ совместимость с конструкционными материалами

Недостатки:

- ✓ низкая теплоемкость;
- ✓ сравнительно высокая $T_{\text{плав}}$;
- ✓ существенная активация (^{24}Na ; $T_{1/2} = 15$ ч);
- ✓ большая активность по отношению к воде

ТЯЖЕЛЫЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Решение проблемы топливобеспечения ядерной энергетики на длительную перспективу возможно только с использованием технологии быстрых реакторов (вовлечение U-238, Th-232).

Одна из перспективных направлений - применение быстрых реакторов с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ):

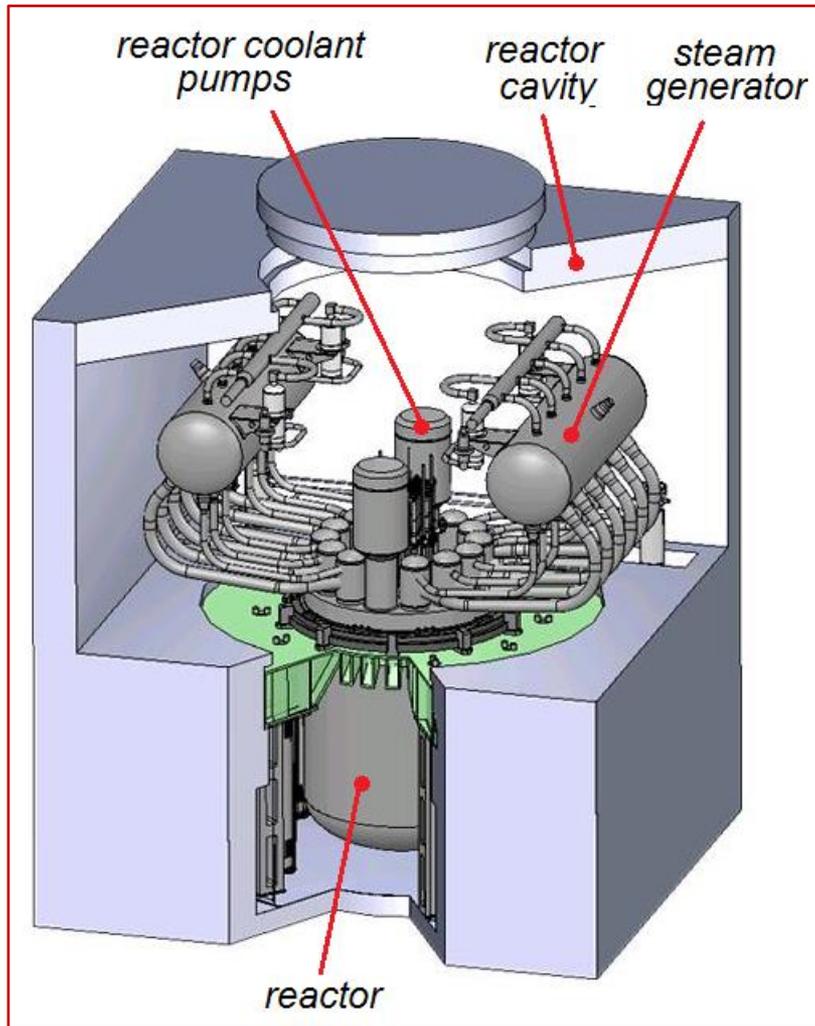
- ❖ свинец Pb;
- ❖ сплав свинец-висмут Pb+Bi

СПЛАВ РВ+ВІ КАК ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

Свойства сплава **44,5 % Pb + 55,5 % Bi**

- Температура плавления 125 °С.
- Температура кипения 1670 °С.
- Увеличение объема при плавлении 1,3 %.
- Плотность 9500 – 10500 кг/м³ (в диапазоне 200...900 °С).
- Теплопроводность ~ 13,7 Вт/м·°С (при 400 °С).
- Теплоемкость ~ 0,1465 кДж/кг ·°С (при 400 °С)

КОМПОНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ РУ СВБР-100



Теплоноситель:
44,5 % Pb + 55,5 % Bi

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СПЛАВА РВ+ВІ

Достоинства:

- ✓ высокая $T_{\text{кип}}$ и соответственно низкое давление P_1 ;
- ✓ неплохие ядерно-физические свойства;
- ✓ химическая инертность (без выделения H_2)
- ✓ низкий коэффициент объемного расширения (сокращение размеров КО)
- ✓ хорошая совместимость с конструкционными материалами

Недостатки:

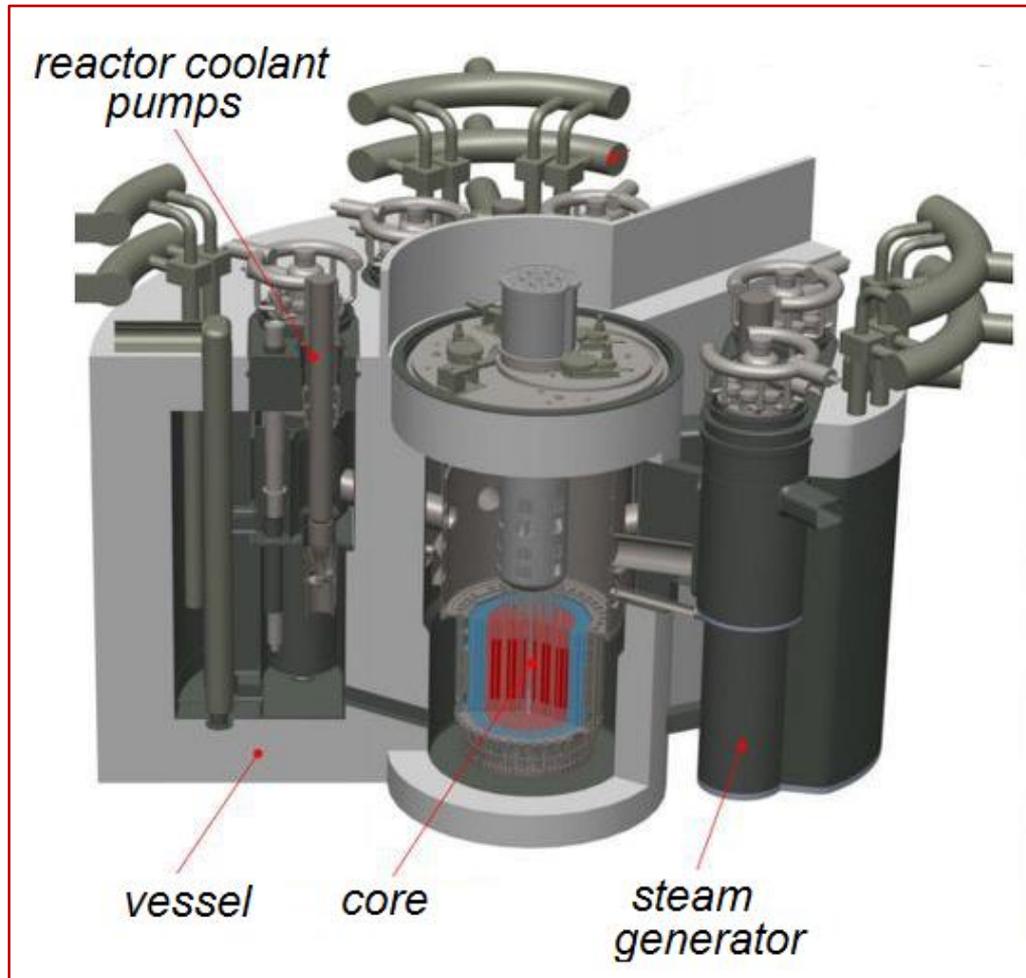
- ✓ низкая теплоемкость;
- ✓ сравнительно высокая $T_{\text{плав}}$;
- ✓ невысокая теплопроводность λ ;
- ✓ существенная активация за счет образования радиоактивного газа Po-210 ($T_{1/2}=138$ дней)

СВИНЕЦ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ АЭС

Свойства свинца

- Температура плавления 327,4 °С.
- Температура кипения 1749 °С.
- Увеличение объема при плавлении 3,7 %.
- Плотность 10125...10592 кг/м³ (в диапазоне 400...800 °С).
- Теплопроводность ~ 15,1 Вт/м·°С (при 400 °С).
- Теплоемкость ~ 0,147 кДж/кг ·°С (при 400 °С)

КОМПОНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ РУ БРЕСТ-300



Теплоноситель: Pb

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ РВ

Достоинства:

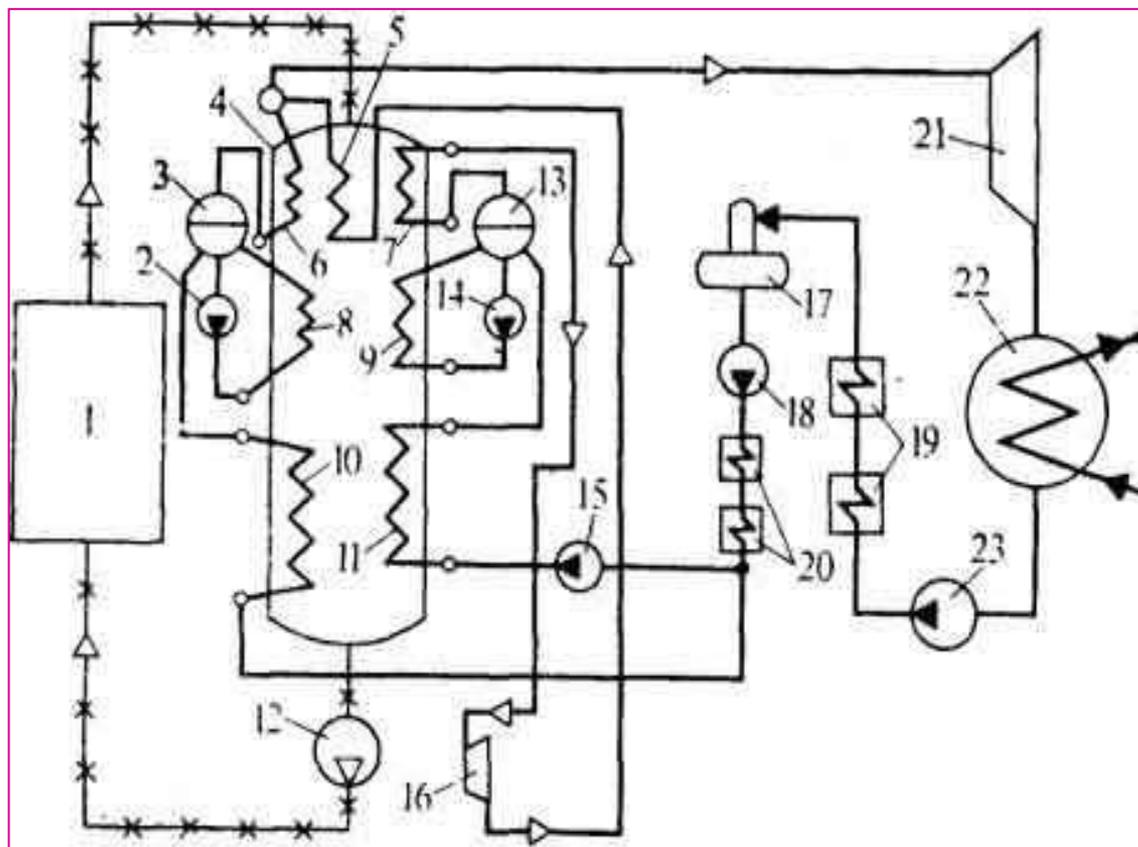
- ✓ высокая $T_{\text{кип}}$;
- ✓ неплохие ядерно-физические свойства;
- ✓ химическая инертность (без выделения H_2);
- ✓ низкий коэффициент объемного расширения;
- ✓ относительно дешевый;

Недостатки:

- ✓ низкая теплоемкость;
- ✓ сравнительно высокая $T_{\text{плав}}$;
- ✓ невысокая теплопроводность λ ;
- ✓ плохая совместимость с нержавеющей сталью

ГАЗООБРАЗНЫЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ СХЕМА АЭС "ДАНДЖНЕСС А» С СО₂ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ)



ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ CO₂

Достоинства:

- ✓ возможность получения высокой температуры на входе в ПГ;
- ✓ неплохие ТФС (высокая λ , низкая μ);
- ✓ хорошие ядерно-физические свойства;
- ✓ отсутствие активации;
- ✓ хорошие эксплуатационные свойства;
- ✓ совместимость с конструкционными материалами (при отсутствии влаги)

Недостатки:

- ✓ низкая плотность (необходимость высоких скоростей и профилированных трубок)
- ✓ небольшая теплоемкость

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ НЕ

Достоинства:

- ✓неплохие ТФС (высокая λ , низкая μ);
- ✓хорошие ядерно-физические свойства;
- ✓отсутствие активации;
- ✓хорошие эксплуатационные свойства;
- ✓очень хорошая совместимость с конструкционными материалами.

Недостатки:

- ✓низкие плотность и тепло-емкость;
- ✓дороговизна;
- ✓текучесть.

Рабочие тела

ТРЕБОВАНИЯ К РАБОЧИМ ТЕЛАМ

1. Требования в отношении термодинамических свойств ($T_{\text{КР}} > T_{\text{МАКС}}$, $P_{\text{МИН}}$ при $T_{\text{РАБ}}$, r/C_p как можно меньше);
2. Требования в отношении теплофизических свойств (высокие теплопроводность и теплоемкость, низкая вязкость);
3. Требования в отношении коррозионно-эрозионных свойств (минимальное коррозионное и эрозионное воздействие на конструкционные материалы);
4. Требования в отношении эксплуатационных свойств (термическая стойкость, активность, нетоксичность, доступность, низкая стоимость и др.)

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**