

План лекции

- Требования к теплоносителям АЭС
- Вода
- Тяжелая вода
- Жидкие металлы
- Газообразные теплоносители

Требования к теплоносителям

Свойства теплоносителей должны удовлетворять требованиям, определяемым условиями протекания процессов в первом контуре АЭС

- Ядерно-физические свойства: вещество из атомов с малым сечением захвата и рассеяния нейтронов. Высокая радиационная стойкость и минимально возможная способность к активации
- Физико-химические свойства: вещество не должно иметь высокой химической и электрохимической активности по отношению к материалам контура и рабочему телу
- Теплофизические свойства: теплоноситель должен обеспечить интенсивный отвод тепла из реактора при высоких температурах - высокая теплоемкость и теплопроводность, высокая температура кипения, низкая вязкость
- Эксплуатационные свойства: дешевое и распространенное вещество, нетоксичное, пожаро- и взрывобезопасное вещество

Требования к теплоносителям

Отсутствует вещество, удовлетворяющее всем требованиям

Наиболее распространенными теплоносителями ЯЭУ по совокупности их теплофизических, ядерно-физических и физико-химических характеристик являются:

- вода (обычная и тяжелая),
- газы (CO_2 , He),
- жидкие металлы (Na) ,
- органические теплоносители.

Теплоносители можно разделить на группы:

- низкотемпературные,
- высокотемпературные ($t > 450^\circ\text{C}$)

Свойства теплоносителей

Свойство	Жидкости		Газы	
	вода	Na	CO ₂	He
Температура плавления $t_{пл}$, °C	0	98		
Температура кипения при н.у., °C	100	883		
Сечение захвата, σ (10^{-28} м ²)	0.6	0.5	0.003	0.001
Теплопроводность λ , Вт/(м К)	0.55	63.80	0.055	0.333
Теплоёмкость c_p , кДж/(кг К)	5,50	1,27	1,16	5,2
Кинемат. вязкость ν , м ² /с * 10^{-7}	1,26	2,89	25,4	753,0
Давление теплоносителя, МПа	16	1	2	1
Максимальная температура, °C	330	600	500	1000

Вода

- Самый дешевый и распространенный жидкий теплоноситель
- Благоприятные теплофизические свойства (высокие плотность, теплопроводность, теплоемкость; низкая вязкость)
- Коэффициенты теплоотдачи:
 - $w=0,3 \text{ м/с} - \alpha = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
 - $w=1,0 \text{ м/с} - \alpha = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
 - $w=5,0 \text{ м/с} - \alpha = 20 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
- Затраты на перекачку воды по контуру невелики
- Хорошие ядерно-физические свойства (не только т/носитель, но и замедлитель)
- Хорошая устойчивость ее по отношению к ионизирующему излучению и практически невысокая склонность к активации
(Период полураспада изотопа O^{19} составляет всего 29,4 сек)

Вода

Недостатки воды:

- Высокое давление ее насыщенного пара, которое быстро растет с повышением температуры (при давлении 0,1 МПа температура насыщения 99.6, а при 22,11 МПа только 374.1°C)
- Температурный уровень отвода тепла из реактора водой невысок – низкие параметры пара
- Зависимость плотности от температуры (пример: при давлении 10 МПа и изменении температуры от 250 до 300 °С удельный объем воды увеличивается на 11 %) – необходимость компенсаторов объема
- Вода — хороший растворитель, что значительно усложняет водоподготовительные установки
- Вода - коррозионно-активное вещество

Насыщенный водяной пар

Свойства – как у воды, но + интенсивность теплопередачи очень высока, так как она происходит при конденсации пара

Тяжелая вода

Тяжелая вода (D_2O) по сравнению с обычной имеет существенно лучшие ядерно-физические свойства (применение тяжелой воды в качестве замедлителя нейтронов позволяет использовать в ядерном реакторе природный уран).

Стоимость тяжелой воды очень высока (в природе – редкость)

По своим физико-химическим свойствам тяжелая вода близка к обычной. Практически мало отличаются и ее теплофизические свойства.

Применяется в основном в Канаде (реакторы Candu)

Жидкие металлы

- Необходимость ЖМТ – использование в реакторах БН
- ЖМТ: калий, натрий, свинец, литий, ртуть.
- Ценные ТФС (очень высокая теплопроводность, низкая вязкость, высокая T кипения)
- Высокая температура кипения - низкие давления Р1
- Неплохие ЯФС – простая атомная структура, не разлагаются под действием ИИ и высоких температур

Параметр	Na	K	Li	Hg	Pb
Температура плавления $t_{пл}$ °С	97,8	63,7	180,5	-38,8	327,0
Температура кипения °С	883,0	760,0	1336,0	357	1737,0
Плотность при $t_{пл}$, кг/м ³	928	819	507	13645	10510
Теплоемкость при $t_{пл}$ кДж/(кг К).	1.38	0,82	4.18	0,14	0.16
Теплопроводность при $t_{пл}$, Вт/(м К) .	86,1	43.8	37.6	8,2	16.3

Жидкие металлы

- Самый распространенный Na - БР-5, БН-350, БН-600, БН-800, Франция, Германия, Япония, США
- Достоинства Na:
 - самая высокая теплопроводность, низкая вязкость, высокая T кипения),
 - совместимость с конструкционными материалами,
 - возможность использовать при низких P - малая толщина корпуса,
 - малое гидравлическое сопротивление
- Недостатки:
 - низкая теплоемкость – большая Δt_1 ,
 - высокая T плавления (98°C),
 - существенная активация ($T_{1/2} = 15$ ч)
 - !!! высокая активность с водой и воздухом
 - приходится покупать в Китае и Франции



Жидкие металлы

- Сначала ртуть
 - 1946 г. в США реактор Clementine
 - чуть позже в Обнинске - БР-2 (БР-1 - воздух)
- 1959 в Обнинске - БР-5. (в 1 контуре - Na, во 2 - сплав Na-K) Сплавы Na и K по свойствам близки к чистым металлам, но теплопроводность ниже (в 2,5 раза). Зато не взрывается.
- Свинец (Pb)
 - пожаро- и взрывобезопасен
 - дешевле натрия
 - Т кипения ещё выше - запас до кризиса теплообмена
 - в случае трещин - сам застынет и загерметизирует
 - Но! - высокая Т плавления - выше давление и установки разогрева
- Свинец - Висмут (Pb-Bi)
 - снижает Т плавления,
 - меньше замедляет нейтроны
 - Большая история использования на АПЛ (только в СССР)
 - Дорогой и редкий металл, проблемы с коррозией, наработка полония
- Проекты: СВБР-100 (2017), БРЕСТ-300 (2020), БН-1200 (2022)



Газообразные теплоносители

- хорошие ядерно-физические свойства газов: - малое сечение захвата тепловых нейтронов дает возможность использовать в газо-охлаждаемых реакторах необогащенный или слегка обогащенный уран;
- простые одноатомные газы в активной зоне реактора не разлагаются и не активируются. Разложение и активация сложных многоатомных газов (CO_2) также незначительны;
- благоприятные эксплуатационные характеристики газо-охлаждаемых реакторов: реактивность реактора с газовым теплоносителем почти не зависит от содержания теплоносителя в активной зоне;
- физико-химические свойства: не обладают химической активностью и коррозионно-инертны (кроме CO_2).
- Основной недостаток:
- плохие теплофизические свойства (низкая теплопроводность, теплоёмкость, плотность) – большие поверхности нагрева, большие расходы, большие затраты на перекачку
- Теплопередающие способности газовых теплоносителей существенно улучшаются при повышении давления. С повышением давления повышается плотность и почти пропорционально снижаются затраты на перекачку. Но увеличиваются кап.затраты на все элементы под давлением

Газообразные теплоносители – гелий (He)

инертный газ, на Земле редкость, но во Вселенной 23%

- Достоинства:

- высокая теплопроводность, низкая вязкость
- отсутствие активации
- совместимость с конструкционными материалами
- альтернатива натрию для высокотемпературных реакторов

- Недостатки:

- малая теплоёмкость
- текучесть
- дороговизна

Газообразные теплоносители – углекислый газ (CO_2)

Активно применялся на первом этапе развития АЭС

- Достоинства:
 - дешевизна и распространенность
- Недостатки:
 - очень низкая теплопроводность
 - большие поверхности нагрева и затраты на перекачку
 - при попадании в воду – образование H_2CO_3 и интенсивная коррозия оборудования