

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Теплоноситель как средство отвода тепла при условии, что почти нет ограничений по мощности энерговыделения.

Основные материалы: вода (с кипением, без кипения), тяжёлая вода, газы (азот, гелий, углекислота, водород, их смеси), жидкие металлы (натрий, калий, литий, висмут, свинец, их сплавы, ртуть), органические вещества.

4.1. Требования к теплоносителям

1. Малая склонность к коррозии и эрозии конструкционных материалов активной зоны.
2. Высокая теплоёмкость и теплопроводность, малая вязкость.
3. Высокая температура кипения и низкая температура плавления.
4. Высокая теплостойкость (температуростойкость) и радиационная стойкость;
5. Малое сечение поглощения тепловых нейтронов.
6. Малое сечение активации и малый период полураспада активированных ядер.
7. Взрывобезопасность, негорючесть, отсутствие токсичности.
8. Доступность, недорогая технология производства и утилизации.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Преимущества жидкометаллических теплоносителей:

- Малая упругость паров. Низкое давление существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию как реактора, так и вспомогательного оборудования станции.
- Высокая [температура кипения](#) жидких металлов. Если температура теплоносителя на выходе из реактора по какой-то причине значительно повысится, то расплавления тепловыделяющих элементов, обусловленного ухудшением теплоотдачи из-за образования паровой плёнки, как это происходит при охлаждении водой, не произойдёт. Примечание. Реактор с натриевым контуром имеет удельную объёмную напряжённость порядка 1000 кВт/л.
- Высокая [электропроводность](#) жидких [щелочных металлов](#) позволяет использовать герметизированные электронасосы (постоянного и переменного тока). По расходу энергии на прокачивание жидкие металлы лишь немногим уступают воде.
- Na и Na—K оказывают малое [коррозионное](#) и [эрозионное](#) воздействие на конструкционные материалы. Для натрия и [эвтектики](#) Na—K можно применять многие из обычных материалов.
- Наиболее дешёвым из жидких металлов является натрий, затем свинец и калий. Поскольку объём теплопередающей системы обычно относительно невелик, а перезарядка производится редко, затраты на теплоноситель незначительны.
- Нет проблемы радиационных нарушений. Хотя некоторая часть атомов жидкого металла и превращается в другой металл (например, ^{24}Na переходит в ^{24}Mg), но количество таких превращений при существующих нейтронных потоках в реакторах ничтожно мало.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Недостатки

- Большая химической активностью. Наибольшую опасность представляет реакция с водой. Поэтому в системах с пароводяными циклами должны быть предусмотрены устройства, обеспечивающие взрывобезопасность. Натрий и Na—K должны храниться в среде инертного газа ([He](#), [Ar](#)).
- Активация теплоносителя приводит к необходимости устраивать для наружной части контура теплопередающей системы биологическую защиту. Повышенные требования к химической чистоте жидких металлов.
- Необходимо иметь дополнительные устройства, которые значительно усложняют технологическую схему ядерно-энергетической установки:
 - установка для плавления и перекачивания жидкого металла в контур (для Na—K-эвтектики плавильный бак не требуется);
 - устройство для удаления окислов. Через это устройство, включенное параллельно основному контуру, устанавливается небольшой расход жидкого металла; таким образом, осуществляется непрерывная очистка теплоносителя от окислов;
 - ловушки для паров жидкого металла, уносимых газовым потоком из системы при её опорожнении и заполнении.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

4.2. Жидкометаллические теплоносители

Физические свойства

Коррозия конструкционных материалов в теплоносителях (растворение, в т. ч. селективное, перенос массы (из горячей зоны в холодную; причина – зависимость растворимости от температуры), межкристаллитная коррозия, смачивание поверхности, при котором происходит проникновение).

Способы подавления коррозии

1. Предварительное насыщение теплоносителя металлом, который растворяется в нём, переходя из конструкционных элементов.
2. Создание специального барьерного слоя с малым коэффициентом диффузии (обычно оксид) на поверхности конструкционного элемента с помощью плазменных технологий.
3. Осаждение слоя металла, который не растворяется в теплоносителе (например, из молибдена).
4. Систематическая очистка теплоносителя от примесей, способствующих коррозии (кислорода и пр.).

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Некоторые физические свойства жидких металлов

Свойство	Ві	РЬ	Li	Hg	К	Na	Na-44% К
Температура плавления, К	544	600	453,5	234,2	336,7	370,8	292
Температура кипения, К	1750	2010	1609	630	1033	1156	1098
Удельная Массовая теплоёмкость при 673 К, кДж/(кг-град)	0,1481	0,1473	4,3263	0,13766	0,7640	1,2782	1,0510
Плотность при температуре плавления, кг/см ³	10	10,7	0,61	13,7	0,82	0,93	0,89
Теплопроводность при 673 К, кДж/(м ч град)	56,0656	54,3920	169,4520	45,3964	142,2560	246,2560	96,6504
Сечение захвата тепловых нейтронов, 10 ⁻²⁸ м ²	0,034	0.17	71	374	1,97	0,52	0,96

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

4.3. Органические теплоносители

Преимущества. Небольшое давление паров. Невысокая наведённая активность.

Недостатки. Низкая радиационная стойкость. Склонность к пиролизу. Токсичны.

Поэтому используются только в исследовательских реакторах небольшой мощности.

4.4. Газовые теплоносители

Преимущества. Позволяет использовать одноконтурную схему охлаждения. Мало сечение поглощения нейтронов. Допускают высокую температуру.

Недостатки. Мал коэффициент теплопроводности. Мала теплоёмкость. Возможна коррозия конструкционных элементов.

4.4.1. CO_2 . Получил широкое распространение в энергетике. Чистота обычно 99,9%. Очень слабо активизируется. Слабо активизируется. Склонен вызывать коррозию при наличии влаги.

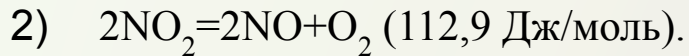
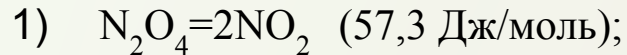
Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

4.4.2. **Не.** Инертный газ. Почти идеален по своим ядерно-физическим свойствам.

Практически нет наведённой активности, если чист. Имеет свойства, близкие к идеальному газу. Хорошие теплофизические свойства. Но обладает очень высокой текучестью и относительно дорог.

4.4.3. **Воздух.** Вызывает коррозию. По этой причине используется только в исследовательских реакторах.

4.4.4. **Диссоциирующие газы.** Тепловой эффект реакции диссоциации (пример):



Далее этот нагретый газ подаётся в турбину. За счёт эффекта диссоциации имеют место очень хорошие теплофизические свойства.

Недостаток: по мере роста давления быстро усиливаются коррозионные свойства.

4.5. Вода

H_2O

Функция – замедлитель нейтронов , отражатель и теплоноситель.

Хорошие теплофизические свойства.

Реакторная водоподготовка. Борьба с примесями и растворёнными газами. Условия для концентрирования примесей.

Накопление водорода из-за радиолиза. Ядерный перегрев пара.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Основное требование – чистота. Дополнительные условия:

- 1) отсутствие солей (электропроводность);
- 2) значение рН (мера активности ионов водорода в растворе, количественно выражающая его кислотность);
- 3) содержание кислорода;
- 4) жёсткость (характеристика содержания в воде растворённых солей щёлочноземельных металлов, главным образом, кальция и магния (так называемых «солей жёсткости»);
- 5) содержание хлоридов;
- 6) содержание продуктов коррозии.

Цех водоподготовки АЭС.

Накопление водорода. Радиолиз. В первом контуре интервале 5-50 см³/литр.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

D₂O

Содержание в природной воде -0,017%.

Очень высокая стоимость, но хорошие ядерно-физические свойства.

Используется в промышленных и исследовательских ядерных реакторах.

Позволяет создать реактор на необогащённом уране.

Получение – с помощью электролиза, дистилляции и т.д.

Тема 4. Теплоносители ядерных энергетических установок

Теплофизические свойства тяжелой воды

Свойство	H ₂ O	D ₂ O
Относительная молекулярная масса, г/моль	18,016	20,029
Плотность при 293 К, г/см ³	0,998	1,106
Температура максимальной плотности, К	276,98	284,21
Температура плавления при нормальном давлении, К	273	276,82
Температура кипения при нормальном давлении, К	373	374,43
Критическая температура, К	647,15	644,5
Критическое давление, МПа	22,565	22,28
Критическая плотность, г/см ³	0,308	0,340
Теплота плавления, кДж/кг	331,9	317,1
Теплота парообразования, кДж/кг	2253	2067
Теплоемкость при 293 К, кДж/(кг град)	4,18	4,196