

# ЯЭУ. Типы ЯЭУ

**Комплекс оборудования, обеспечивающий работу ядерного реактора, вывод из реактора тепловой энергии и преобразования ее в энергию другого вида, составляет ядерную энергетическую установку (ЯЭУ).**

Всех потребителей по виду используемой энергии можно разделить на следующие группы:

- потребители тепловой энергии
  - потребители электрической энергии
  - потребители механической энергии
- 

ЯЭУ будем классифицировать, в первую очередь, по этим же признакам:

- ЯЭУ для производства тепловой энергии
- ЯЭУ для производства электрической энергии
- ЯЭУ для производства механической энергии
- Исследовательские ЯЭУ

В каждой группе можно провести дополнительную классификацию по другим признакам.

# Требования к технологическому оборудованию ЯЭУ

- Важнейшим требованием является обеспечение высокой надежности и безопасной работы ЯЭУ.
- Наиболее жесткие требования предъявляются к первому контуру. Утечки теплоносителя должны быть исключены, а если это невозможно, то протечки должны быть сведены к минимуму и находиться под контролем. Как правило, контур теплоносителя должен размещаться в герметичных помещениях.
- Большое значение имеет правильный выбор материалов для изготовления корпусов реакторов, т.к. они находятся в поле интенсивного излучения в течение всего ресурса эксплуатации. Поэтому должны обладать высокой прочностью при достаточной пластичности и коррозионной стойкости.
- Парогенератор является элементом, в котором одновременно находится теплоноситель и рабочее тело. Поскольку их контакт должен быть исключен, то отсюда вытекают высокие требования к герметичности всех соединений в ПГ, к качеству изготовления ПГ

# Требования к оборудованию ЯЭУ (продолжение)

- На АСТ отсутствует ТУ, и они выполняются трех- или даже четырехконтурными. В первом контуре таких ЯЭУ, как правило, используется естественная циркуляция теплоносителя.
- Для судовых ЯЭУ дополнительные требования к автономности работы и маневренности оборудования.
- Для специальных ЯЭУ требования формулируются в зависимости от конкретного назначения установки (например, для ЯЭУ, предназначенных для технологических целей, необходимы высокотемпературные реакторы).
- Для космических ЯЭУ важны компактность оборудования, минимальный вес, надежная работа в автономном режиме.

# Теплоносители и рабочие тела

- Теплоноситель – это среда (вещество), используемое для отвода тепла от активной зоны реактора.
- Рабочее тело – это среда (вещество), служащее для преобразования тепловой энергии в другой вид энергии.

# Требования к теплоносителям.

- Теплоносители работают в условиях интенсивного облучения, а также при повышенных температурах и давлениях. Все требования к теплоносителям можно объединить в четыре основных группы:
- ядерно-физические
- тепло-гидравлические
- физико-химические
- эксплуатационные.

# Ядерно-физические требования

- малое сечение поглощения нейтронов
- малое сечение рассеяния нейтронов  
(для реакторов на быстрых нейтронах)
- большое сечение рассеяния нейтронов  
(для реакторов на тепловых нейтронах)
- высокая радиационная стойкость
- малая способность к активации

# Тепло-гидравлические требования

- высокий коэффициент теплообмена
- малые затраты на прокачку.

# Физико-химические требования

- коррозионная инертность по отношению к конструкционным материалам
- химическая инертность по отношению к рабочему телу и окружающей среде
- термическая стойкость.

# Эксплуатационные требования

- высокий температурный уровень отвода тепла из реактора
- низкое давление
- пожаробезопасность
- нетоксичность
- отсутствие дополнительных усложняющих устройств в контуре
- распространенность, доступность, дешевизна.

# Вода (обычная и тяжелая).

- Относится к низкотемпературным водородсодержащим теплоносителям.
- Обычная вода – наиболее распространенный и дешевый теплоноситель. Имеет большое сечение рассеяния, относительно небольшое сечение поглощения (тяжелая вода имеет малое сечение поглощения, так что можно использовать слабо обогащенный уран или даже природный уран, но тяжелая вода очень дорогая).
- В поле интенсивного облучения имеет место радиолиз воды, т.е. распад воды на водород и кислород, а также ее активация.
- Поглощение нейтронов обычной водой приводит к необходимости использовать обогащенный уран.
- Т.к. вода обладает высокой теплоемкостью, относительно низкой вязкостью, а коэффициент теплообмена возрастает с ростом скорости весьма значительно, то приемлемые коэффициенты теплоотдачи достигаются при умеренных скоростях (5 – 8 м/сек). А это значит, что затраты на прокачку воды не очень велики, меньше чем для многих других теплоносителей.

## Вода (продолжение)

- Вода коррозионноактивна по отношению к конструкционным материалам, а при температурах выше  $300^{\circ}\text{C}$  и повышенных давлениях наблюдается интенсификация коррозионных процессов. В этом заключается один из недостатков воды как теплоносителя.
- Поэтому в первом контуре приходится использовать дорогостоящие коррозионностойкие материалы. К рабочему телу и окружающей среде химически инертна.
- Одним из недостатков воды является высокое давление ее насыщенных паров. Причем с ростом температуры давление насыщенного пара резко возрастает. Все это определяет очень высокое давление воды в первом контуре и низкий температурный уровень отвода тепла из реактора.
- Вода нетоксична, пожаробезопасна.
- Вода является практически несжимаемой жидкостью и при этом у нее довольно заметно изменяется плотность (удельный объем) при изменении температуры. Это в свою очередь требует установки в контуре дополнительных усложняющих устройств – системы компенсации давления (КД).

# Жидкометаллические теплоносители.

- Использование жидких металлов в качестве теплоносителей связано с развитием реакторов на быстрых нейтронах.
- Жидкометаллические теплоносители являются высокотемпературными. На сегодняшний день в промышленной ядерной энергетике используется жидкий натрий, на судовых установках использовался сплав свинец-висмут.
- Кроме этого, в качестве модельного теплоносителя в исследовательских целях часто используется сплав натрия-калий.
- Жидкие металлы имеют простую атомарную структуру, стабильны в условиях нагрева и облучения. Их ядерно-физические характеристики таковы, что они имеют малую замедляющую способность, достаточно малое сечение поглощения.
- Теплопроводность жидких металлов намного выше теплопроводности других классов теплоносителей. Обеспечивают высокий коэффициент теплообмена, что в определенной степени компенсирует их малую теплоемкость. Затраты на прокачку вполне приемлемые.
- Одним из существенных недостатков натрия как теплоносителя является высокая активация при облучении и высокая химическая активность по отношению к рабочему телу (воде) и окружающей среде.
- Коррозионно неактивны, однако, у натрия есть избирательная способность к переносу массы по контуру

# Жидкие металлы (продолжение)

- Высокая температура кипения и низкое давление насыщенного пара не ограничивают температуру нагрева при малых давлениях.
- Максимальная температура жидкометаллических теплоносителей ограничена предельными рабочими температурами конструкционных материалов.
- Натрий пожароопасен, пары свинца токсичны.
- Т.к. температура плавления довольно высокая, то требуются дополнительные системы разогрева контура перед пуском.
- Натрий достаточно широко распространен и дешев.

# Газообразные теплоносители.

- Из всех возможных газообразных теплоносителей в ядерной энергетике используются углекислый газ и гелий.
- Прежде всего, следует отметить хорошие ядерно-физические свойства газовых теплоносителей. Они имеют малое сечение поглощения нейтронов, очень слабо активируются и радиационно стойки в диапазоне рабочих температур.
- С другой стороны, они имеют низкую плотность, низкую теплоемкость и теплопроводность, что обуславливает низкий коэффициент теплоотдачи и большие затраты на прокачку.
- Газовые теплоносители коррозионно инертны по отношению к конструкционным материалам, химически инертны по отношению к рабочему телу и окружающей среде, термически стойки.
- Уровень отвода тепла из реактора довольно высокий при умеренных и низких давлениях (давление приходится повышать, чтобы уменьшить затраты на прокачку).
- Пожаробезопасны, нетоксичны. Углекислый газ дешев, гелий дорогой
- При использовании углекислого газа в качестве теплоносителя было обнаружено, что при температурах свыше  $650^{\circ}\text{C}$  наблюдается его повышенная коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам.
- Поэтому углекислый газ непригоден для использования в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах. Для этих реакторов наиболее подходящим теплоносителем является гелий.

# Рабочие тела

- Водяной пар в настоящее время является основным рабочим телом ЯЭУ.
- Практически все стационарные и транспортные ЯЭУ работают по паровому циклу.
- Использование водяного пара как основного рабочего тела обусловлено его хорошей отработанностью в обычной тепловой энергетике.
- Что касается газотурбинных циклов, то они находятся только в стадии разработки. Газотурбинные установки становятся конкурентноспособными с паротурбинными установками при температуре газа  $>1100$  К.
- Такой уровень температуры в ЯЭУ сейчас только начинает осваиваться.
- В газотурбинном цикле в качестве рабочего тела может быть использован как газовый теплоноситель (одноконтурные ЯЭУ), так и другие газы, если речь идет о многоконтурных ЯЭУ.