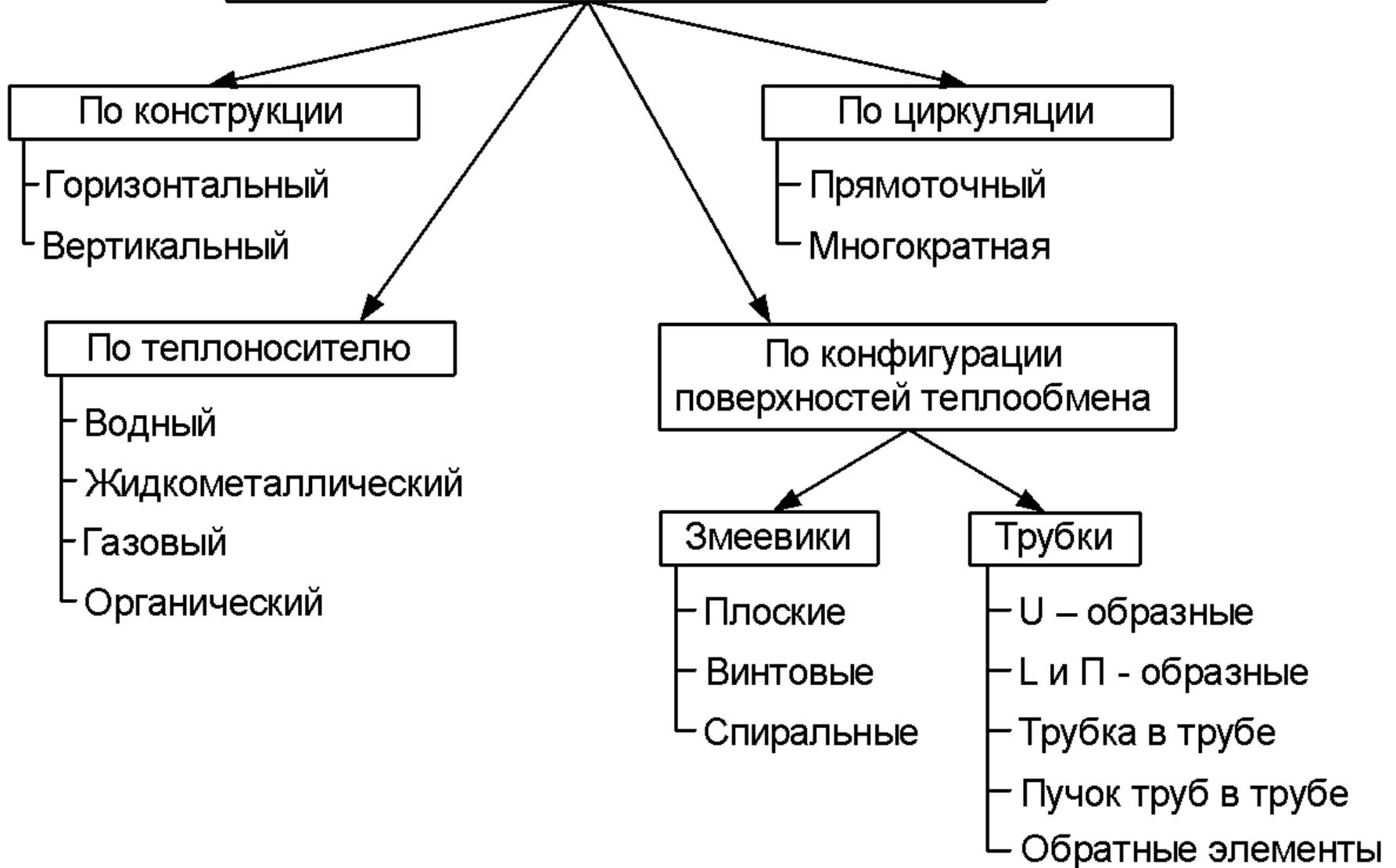


Реакторы и парогенераторы АЭС

Лекция 25

Парогенераторы АЭС

Классификация парогенераторов АЭС



Требования к ПГ

1. Схема ПГ и конструкция его элементов должны обеспечить необходимую производительность и заданные параметры пара при любых режимах работы АЭС.
2. Единичная мощность ПГ должна быть максимально возможной при заданных условиях.

3. Все элементы ПГ должны обладать безусловной надежностью и абсолютной безопасностью. Поверхность теплообмена в ПГ выполняется из большого количества труб малого диаметра, т.е. в ней сосредоточивается большое количество соединений труб первого радиоактивного контура. В связи с этим надежность работы АЭС в значительной степени определяется надежностью работы ПГ. Необходимо правильно решать вопросы радиационной защиты: ПГ и обеспечивать прочность всех элементов конструкции.

4. Соединения элементов и деталей ПГ должны обеспечивать плотность, исключаящую возможность перетечек из одного контура в другой. Скольконибудь существенное попадание теплоносителя в рабочее тело недопустимо, так как паротурбинный контур не имеет биологической защиты.

5. Возможность интенсификации коррозионных процессов должна быть исключена. Здесь имеется в виду как снижение надежности ПГ, так и загрязнение теплоносителя продуктами коррозии. Чрезмерное их попадание в первый контур приведет к повышению радиоактивности теплоносителя и отложению радиоактивных продуктов коррозии в первом контуре. Наиболее опасны отложения продуктов коррозии на тепловыделяющих элементах. В этом случае может произойти резкое уменьшение теплоотвода.

6. ПГ должен вырабатывать пар необходимой чистоты, что обеспечить надежность высокотемпературных пароперегревателей, и также надежную и экономичную работу турбины.
7. Конструкция элементов ПГ должна быть проста и компактна, должна обеспечивать удобство монтажа и эксплуатации, возможность обнаружения и ликвидации повреждений, возможность полного дренирования.

8. Схема и конструкция ПГ должны обеспечить высокие технико-экономические показатели. При проектировании ПГ бывают заданными вид и параметры теплоносителя и рабочего тела на входе и выходе.

Теплоносители

- Теплоносители, отводящие тепло от активной зоны реактора и отдающие его в ПГ для производства рабочего пара, должны удовлетворять нескольким требованиям, определяемым условиями протекания ядерно-физических, теплофизических и физико-химических процессов в первом контуре АЭС.

- В отношении ядерно-физических свойств теплоносители должны состоять из атомов с возможно малыми сечениями захвата и рассеяния нейтронов, иметь высокую радиационную устойчивость и минимально возможную способность к активации при прохождении через активную зону реактора.

- При рассмотрении физико-химических свойств теплоносителей в первую очередь следует обращать внимание на их химическую и электрохимическую активность по отношению к материалам контура, на эффекты химического взаимодействия с рабочим телом. Очевидно, наиболее приемлемыми с этой точки зрения были бы вещества, минимально взаимодействующие с другими в условиях первого контура.
- Вместе с тем теплоноситель должен быть дешевым и распространенным веществом.

- Большое значение для ядерной энергетики имеет применение теплоносителей, способных отводить тепло из реактора при высоких температурах. Чем выше температура на выходе из реактора тем выше могут быть параметры пара, вырабатываемого ПГ. Наивысшие возможные значения этой температуры зависят для разных теплоносителей в основном от их теплофизических и физико-химических свойств. Последние должны рассматриваться с точки зрения изменения интенсивности взаимодействия теплоносителей с материалами и термической стойкости их при повышении температуры.

- Газообразные и жидкометаллические теплоносители не имеют ограничений по наивысшей температуре. Но следует отметить, что из-за плохих теплофизических свойств газов, обуславливающих весьма большую разность температур на границе стенка-газ получение высоких температур газа на выходе из реактора возможно только при интенсификации теплоотдачи. В условиях реактор: заметная интенсификация теплоотдачи может быть осуществлен главным образом при увеличении массовой скорости, что может быть достигнуто некоторым повышением давления газа в контуре.

- Получение высоких температур воды требует создания в контуре высоких давлений, что практически ограничивает максимально достижимую температуру ее на выходе из реактора. Для органических теплоносителей такое ограничение накладывает их недостаточная термическая стойкость.

- Следовательно, только жидкие металлы и газы дают возможность получить на выходе из реактора высокие температуры, позволяющие вырабатывать в ПГ пар высоких, сверхвысоких и закритических параметров. Таким образом, теплоносители можно разделить на две группы: *низкотемпературные и высокотемпературные* (температура на выходе из реактора более 450°C).

Вода

- Вода относится к низкотемпературным теплоносителям
- Обычная вода – наиболее дешевый и распространенный жидкий теплоноситель. Сочетание ее физических и теплофизических свойств (плотность, теплопроводность, вязкость, теплоемкость), определяющих интенсивность теплообмена и расход теплоносителя, является весьма благоприятным.

- Коэффициенты теплоотдачи для воды достигают больших значений при относительно малых скоростях и резко увеличиваются с их ростом.
- К положительным свойствам воды относятся хорошая устойчивость ее по отношению к ионизирующему излучению и практически невысокая склонность к активации.

- Из недостатков воды в первую очередь следует иметь в виду, как самый серьезный высокое давление ее насыщенного пара, которое к тому же быстро растет с повышением температуры. Так, при давлении 0,1 МПа температура насыщения $99,6^{\circ}\text{C}$, а при $22,11$ – только $374,1^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при увеличении давления более чем в 200 раз температура насыщенного пара повышается всего несколько более чем в три раза.

- Температурный уровень отвода тепла из реактора водой невысок. В связи с этим невысоки и параметры рабочего пара, вырабатываемого ПГ, обогреваемыми водой под давлением.
- Определенный недостаток воды – зависимость ее плотности от температуры (влияние давления на плотность пренебрежимо мало), увеличивающаяся с ростом температуры. При давлении 10 МПа, например, при изменении температуры 250 до 300°С удельный объем воды увеличивается примерно на 11%. В связи с этим в первом контуре необходимо предусматривать специальные компенсирующие устройства (компенсатор объема).

- Вода – хороший растворитель, и это свойство значительно усложняет водоподготовительные установки, которые должны очищать воду не только от взвешенных или коллоидных частиц, но и от растворенных.

- Вода – весьма коррозионно-активное вещество. Интенсивность коррозионных процессов при смывании водой различных конструкционных материалов зависит от температуры, наличия в воде растворенных примесей (твердых веществ и газов), концентрации свободных ионов водорода (рН) и некоторых других менее существенных факторов. Коррозионные процессы, даже если они протекают с небольшими скоростями, загрязняют воду как растворенными, так и твердыми частицами, которые активируются в реакторе.

- Тяжелая вода имеет по сравнению с обычной водой существенно лучшие ядерно-физические свойства. Применение тяжелой воды в качестве замедлителя нейтронов позволяет использовать в ядерном реакторе природный уран. Уменьшается первоначальная загрузка топлива и ежегодное потребление его. Наибольшая экономия получается в том случае, если тяжелая вода используется и как замедлитель, и как теплоноситель.

Органические теплоносители.

- Органические вещества, так же как и вода, являются водородсодержащими соединениями, что говорит об их хороших ядерно-физических свойствах. В отличие от воды, они имеют сравнительно высокую температуру кипения при умеренных давлениях.

- Опыт использования органических теплоносителей показал возможность их применения в обычных теплообменных установках показал и их сравнительно высокую (до 450°С) стойкость к высоким температурам, но исследования в условиях ионизирующего облучения обнаружили склонность их к разложению и полимеризации.

- Разложение органических соединений под действием ионизирующего излучения и высоких температур приводит к изменению их первоначальных свойств и во многих случаях сопровождается выпадением продуктов разложения в контуре. Более или менее удовлетворительную стабильность при этих условиях имеют некоторые смеси полифенилов (при температурах 400°С и несколько больше).

- Физические и теплофизические свойства полифенилов хуже, чем воды: их плотность, теплоемкость, теплопроводность сравнительно малы, а вязкость высока. При одинаковых скоростях движения полифенилов и воды коэффициент теплоотдачи полифенилов меньше на 20%. Затраты на перекачку теплоносителя для переноса одинаковых количеств тепла у полифенилов больше, чем у воды.

- Помимо худших теплопередающих показателей следует иметь в виду необходимость предусматривать в контуре специальные установки для очистки теплоносителя от высокомолекулярных соединений, а для некоторых и установки для перевода в жидкое состояние во время пуска.

- Органические теплоносители обладают многими положительными свойствами. Они практически не взаимодействуют с конструкционными материалами контура, слабо активируются при прохождении через активную зону реактора. Возможность нагрева их до 400°C позволяет осуществить для среднего давления рабочего тела паросиловой цикл с заметным перегревом пара, что повышает термический КПД станции.

- Коррозионная инертность органических теплоносителей и незначительные давления в первом контуре позволяют применить для всего первого контура, кроме активной зоны реактора, элементы из углеродистой стали. Этим можно достигнуть значительного удешевления и упрощения конструкции реактора, трубопроводов и ПГ. Однако к настоящему времени установлено, что существующие органические теплоносители не конкурентоспособны по отношению к воде не только для мощных АЭС, но и для установок малой мощности.

Жидкие металлы

- Применение жидкометаллических теплоносителей вызвано внедрением в энергетику реакторов на быстрых нейтронах, требующих высокой удельной теплоты в активной зоне.
- Одновременно обеспечиваются любые параметры паросилового цикла. Жидкие металлы имеют простую атомную структуру, практически не разлагаются под действием облучения и нагрева в активной зоне реактора.

- Их высокая температура кипения и низкое давление насыщенных паров не ограничивают температуру нагрева при самых малых давлениях в контуре. Жидкие металлы обладают хорошими теплофизическими свойствами. В первую очередь это относится к теплопроводности, которая выше, чем у воды. Поэтому интенсивность теплообмена для всех жидких металлов намного выше, чем для воды.

- Теплоемкость жидких металлов невысока, однако это не приводит к увеличению расхода теплоносителя, так как высокая интенсивность теплообмена позволяет получать значительную разность температур теплоносителя на входе в реактор и выходе из него. Верхний температурный предел применения жидких металлов ограничивается жаропрочностью конструкционных материалов.

- По ядерно-физическим, теплофизическим, физико-химическим свойствам можно считать наиболее предпочтительными натрий, калий и их сплавы. Несмотря на существенные недостатки, такие, как высокая химическая активность по отношению к воде и воздуху и активация в реакторе наиболее эффективным жидкометаллическим теплоносителем все же является натрий.

- Натрий обладает самой высокой из всех теплоносителей теплопроводностью, его плотность и вязкость такие же, как у воды, а теплоемкость выше, чем у других жидких металлов (кроме лития). Калий практически по всем свойствам, кроме температуры плавления, уступает натрию.

- Сплавы натрия с калием имеют температуру плавления существенно ниже, чем температура плавления самих металлов. Теплофизические свойства сплавов близки к свойствам чистых натрия и калия. Основное ухудшение свойств сплавов по сравнению с чистым натрием заключается в уменьшении теплопроводности. Так, теплопроводность сплава Na—K (25% Na, 75% K), температура плавления которого равна -11°C , в 2,5 раза ниже, чем теплопроводность Na (а следовательно, примерно в 2,5 раза ниже интенсивность передачи тепла при прочих равных условиях). В связи с этим для всех осуществленных АЭС в качестве жидкометаллического теплоносителя выбран натрий.

Газообразные теплоносители

- Специфика характеристик газообразных веществ вызывает противоречия при оценке их как теплоносителей ЯЭУ. Первое, что привлекает к ним внимание, - весьма хорошие ядерно-физические свойства. Незначительные сечения захвата тепловых нейтронов дают возможность использовать в реакторах необогащенный уран. Простые одноатомные газы (кроме азота и аргона) в активной зоне реактора не разлагаются и не активируются. Разложение и активация сложных многоатомных газов также незначительны

- Физико-химические свойства газообразных веществ вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к теплоносителям, так как они не обладают химической активностью и коррозионно инертны. По теплофизическим свойствам большинство газообразных веществ (кроме гелия и водорода) являются плохими теплоносителями. Теплоемкость, плотность и теплопроводность их очень малы. В соответствии с этим для отвода тепла необходимо прокачивать весьма большие объемы теплоносителя.

- Плохие теплопередающие свойства затрудняют получение высоких температур на выходе из реактора из-за больших перепадов температур между стенкой тепловыделяющего элемента и газом. Эта же причина вызывает необходимость обеспечения больших поверхностей теплообмена в реакторе и ПГ. Большие объемные расходы теплоносителя, значительные гидравлические сопротивления поверхностей теплообмена и газопроводов приводят к чрезмерным затратам энергии на перекачку теплоносителя.

- **Воздух и азот.** Эти теплоносители по эффективности теплообмена примерно одинаковы, но они существенно активизируются в реакторе с образованием радиоактивных нуклидов.
- **Водород** мог бы быть лучшим теплоносителем с точки зрения теплопередающих свойств. При малой плотности он имеет весьма большую объемную теплоемкость и самый большой для газов коэффициент теплопроводности. Однако его химическая активность не дает возможности рассматривать его практическое применение.

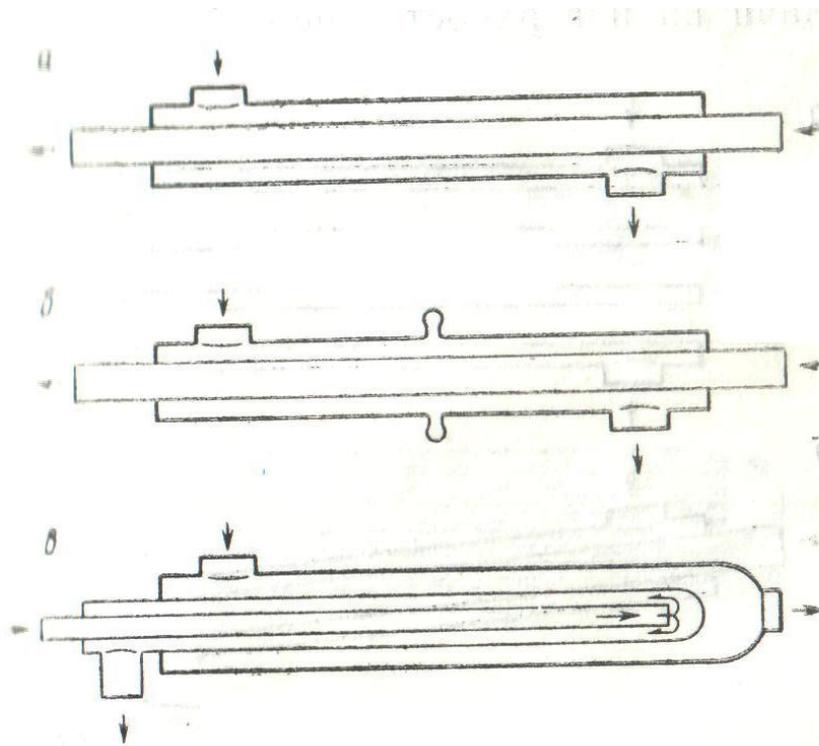
- **Гелий.** Гелий – инертный газ, по своим теплопередающим свойствам он несущественно уступает водороду. Теплопроводность гелия на порядок выше теплопроводности других (кроме водорода) газов. В силу этого гелий при прочих равных условиях может воспринять большое количество тепла за счет увеличения разности температур на входе в поверхность теплообмена и выходе из нее. При одной и той же тепловой мощности площадь поверхности теплообмена, омываемой гелием, примерно на 30% меньше, чем при использовании углекислого газа.

- Гелий – самый перспективный теплоноситель для высокотемпературных ЯЭУ, позволяющих получить высокие, сверхвысокие и критические параметры. В настоящее время гелий рассматривается также, как альтернативный по отношению к натрию теплоноситель для реакторов на быстрых нейтронах. Однако это потребует освоения весьма высоких давлений и в первом контуре. Из недостатков гелия следует иметь в виду его малую объемную теплоемкость. Поэтому для переноса больших количеств тепла нужно предусматривать большие, чем а же в случае применения углекислого газа, температурные перепады на входе в поверхность теплообмена и выходе из нее. При практическом использовании гелия нужно иметь в виду его высокую стоимость и такое свойство, как текучесть (способность проходить через очень малые неплотности).

- **Углекислый газ.** Этот газ применялся до последнего времени в качестве газового теплоносителя в ядерной энергетике наиболее широко. Если по теплопроводности и интенсивности теплообмена он существенно уступает гелию, то по затратам на перекачку (при одной и той же мощности реактора) он несколько лучше. Теплопередающие способности газовых теплоносителей существенно улучшаются с увеличением давления: с повышением давления повышается плотность и почти пропорционально снижаются затраты на перекачку.

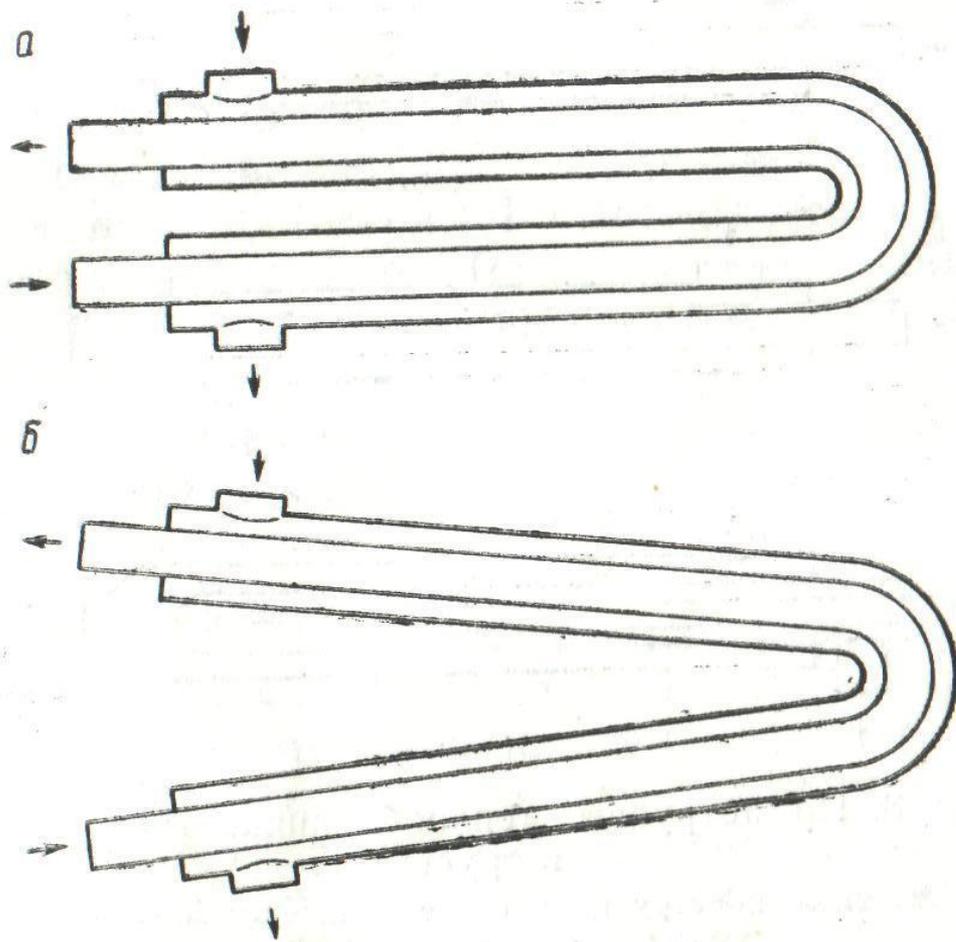
- Если затраты на перекачку сохранить такими же как и при низких давлениях , то можно повысить интенсивность теплообмена за счет повышения массовой скорости. При использовании газового теплоносителя выбор давления – сложный технико-экономический вопрос. Повышение давления приводит к снижению затрат на перекачку, уменьшению поверхности теплообмена, повышению температуры газа на выходе из реактора. Но одновременно увеличиваются капитальные затраты на все элементы работающие под давлением.

Конструктивные схемы

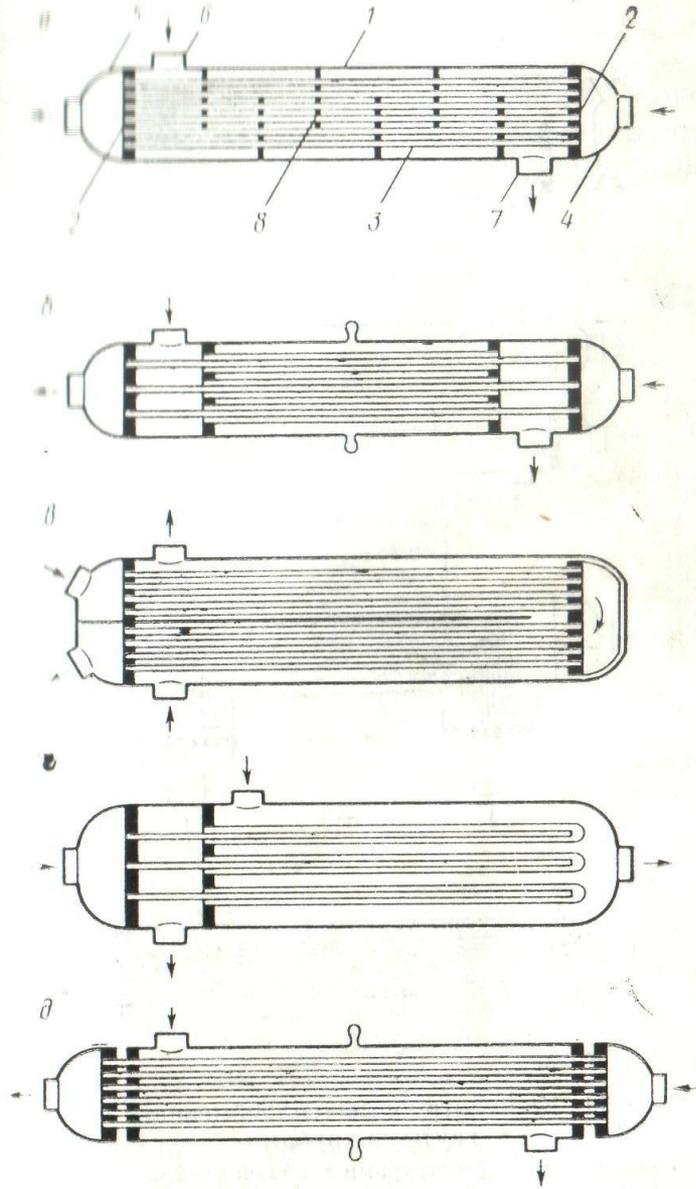


Прямотрубные теплообменники типа «труба в трубе».

а — жесткой конструкции; б — с линзовым компенсатором; в — с трубкой Фильда

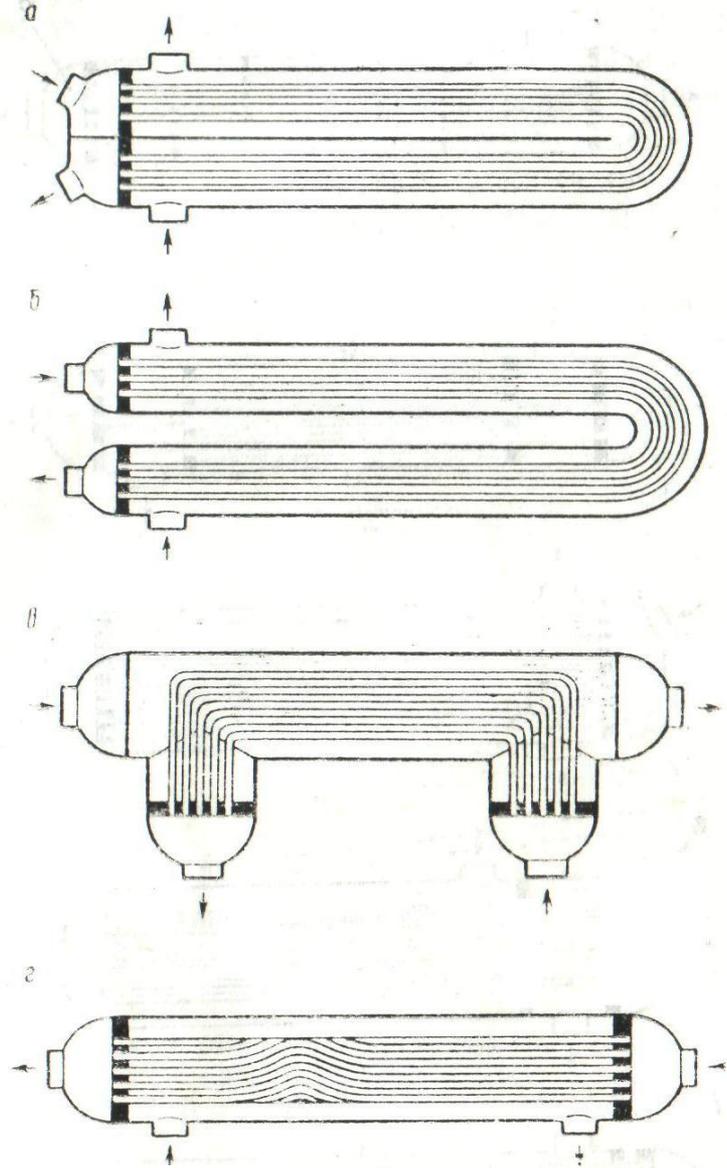


Теплообменники типа «труба в трубе»
с изогнутыми трубами
а — U-образный; б — V-образный



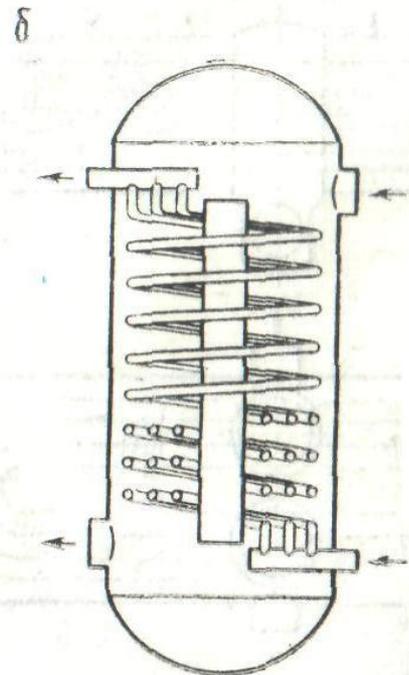
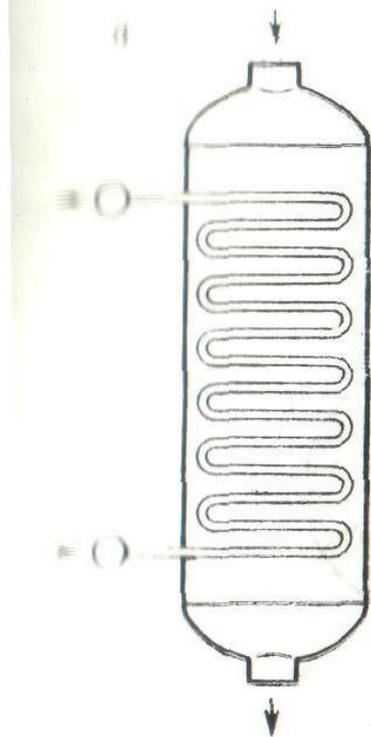
Кожухотрубные теплообменники с прямыми трубами

а — жесткой конструкции; *б* — с компенсатором на кожухе и с применением труб-чехлов; *в* — с плавающей головкой; *г* — с трубками Фильда; *д* — с компенсатором на кожухе и с двойными трубными досками

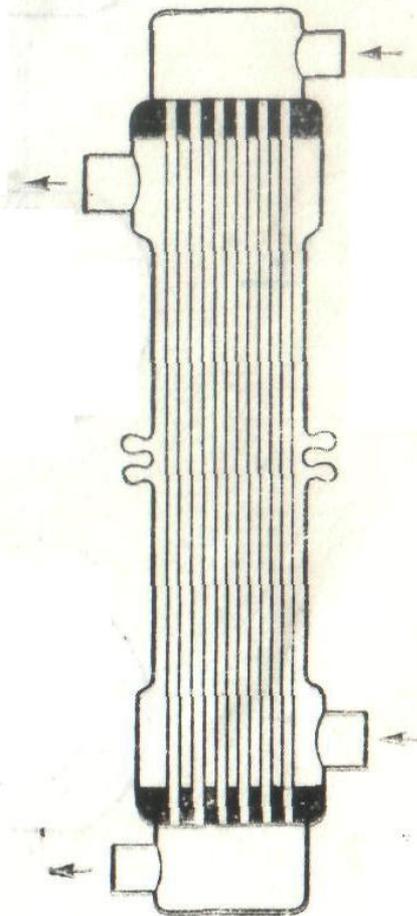


Кожухотрубные теплообменники с изогнутыми трубами

- a* — с U-образными трубами и общей трубной доской;
б — с U-образными трубами и U-образным кожухом;
в — с П-образными трубами; *г* — с синусоидальным прогибом труб



Кожухотрубные теплообменники с плоскими (а) и винтовыми (б) змеевиками



Модуль парогенератора установки БН-600

Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	Вертикальный	
По циркуляции	Естественная	
По теплоносителю	Газ	
Змеевики	плоские	
Трубки	-	
Корпус	Многокорпусной	
Перегрев пара	Есть	
Сепарация	Пар и сепарация в одном корпусе	

1 вариант

Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	Горизонтальный	
По циркуляции	Естественная	
По теплоносителю	Вода	
Змеевики	винтовые	
Трубки	-	
Корпус	Многокорпусной	
Перегрев пара	есть	
Сепарация	Пар и сепарация в разных корпусах	

2 вариант

Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	Вертикальный	
По циркуляции	Принудительная	
По теплоносителю	Жидкий металл	
Змеевики	Плоские	
Трубки	U-образные	
Корпус	Многокорпусной	
Перегрев пара	есть	
Сепарация	Пар и сепарация в разных корпусах	

3 вариант

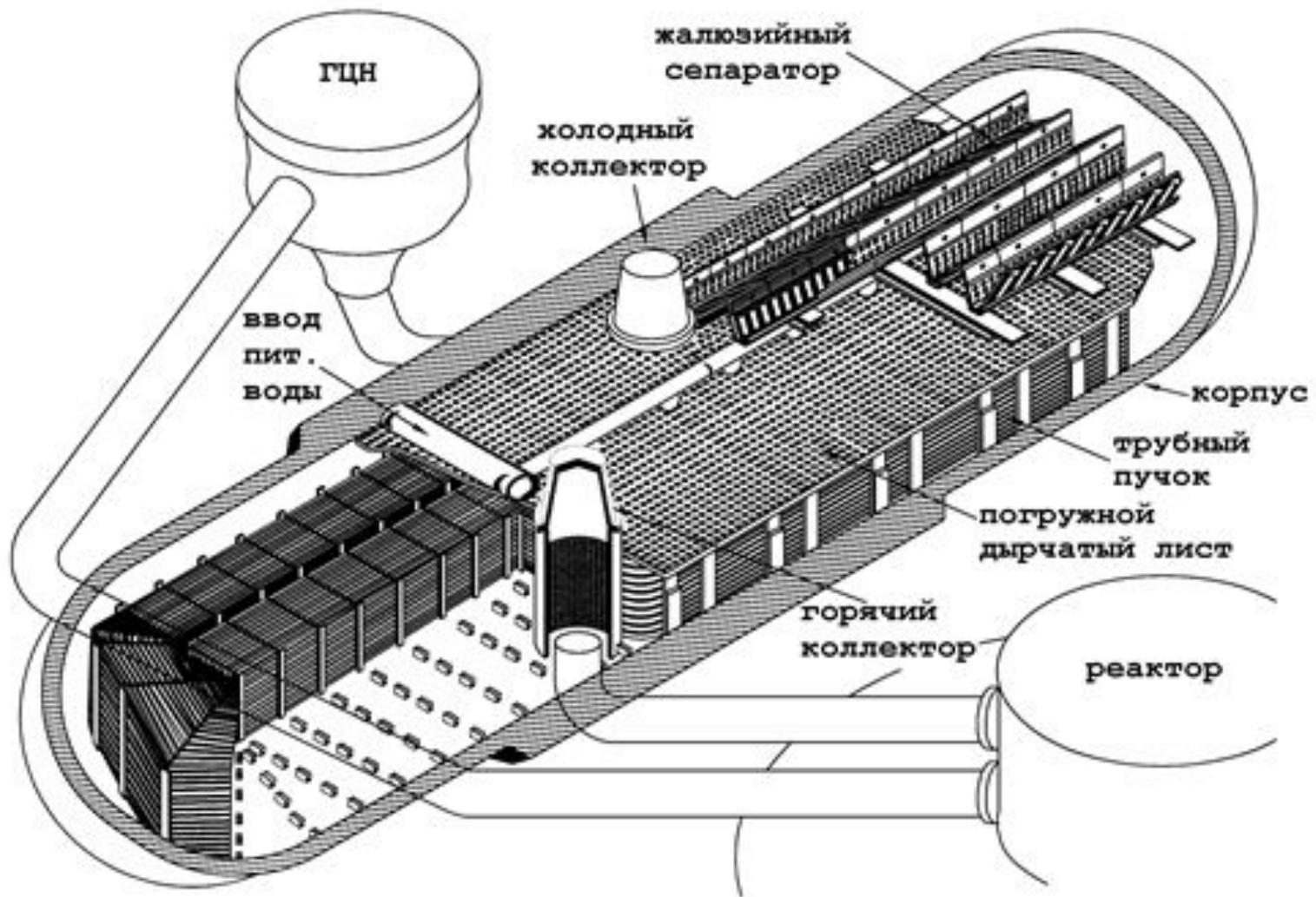
Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	горизонтальный	
По циркуляции	естественная	
По теплоносителю	вода	
Змеевики	-	
Трубки	U-образные	
Корпус	один	
Перегрев пара	есть	
Сепарация	Пар и сепарация в одном корпусе	

4 вариант

Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	горизонтальный	
По циркуляции	естественная	
По теплоносителю	газ	
Змеевики	плоские	
Трубки	U-образные	
Корпус	Многокорпусной	
Перегрев пара	есть	
Сепарация	Пар и сепарация в одном корпусе	

5 вариант

Характеристика	Наименование	Прим.
По конструкции	вертикальный	
По циркуляции	естественная	
По теплоносителю	вода	
Змеевики	винтовые	
Трубки	L-образные	
Корпус	Многокорпусной	
Перегрев пара	нет	
Сепарация	Пар и сепарация в разных корпусах	





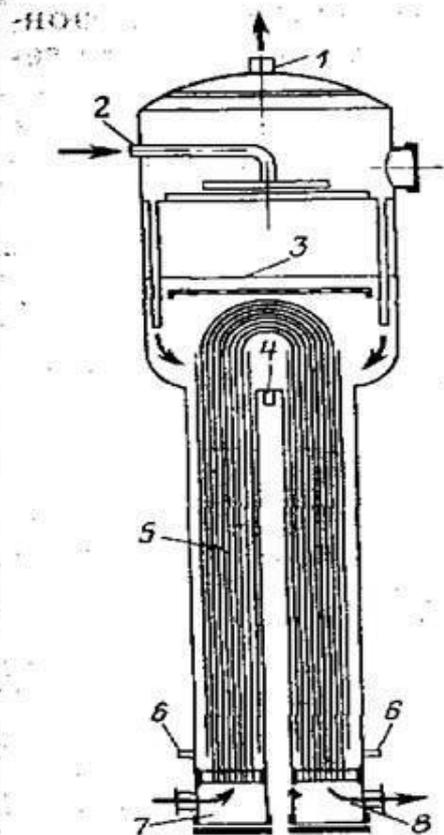


Рис. 19.4. Вертикальный парогенератор для АЭС с ВВЭР с U-образными трубными пучками:
 1 — отвод пара к турбине; 2 — подвод питательной воды; 3 — уровень; 4 — непрерывная продувка; 5 — трубный пучок; 6 — периодическая продувка; 7 — входной коллектор теплоносителя; 8 — выходной коллектор теплоносителя

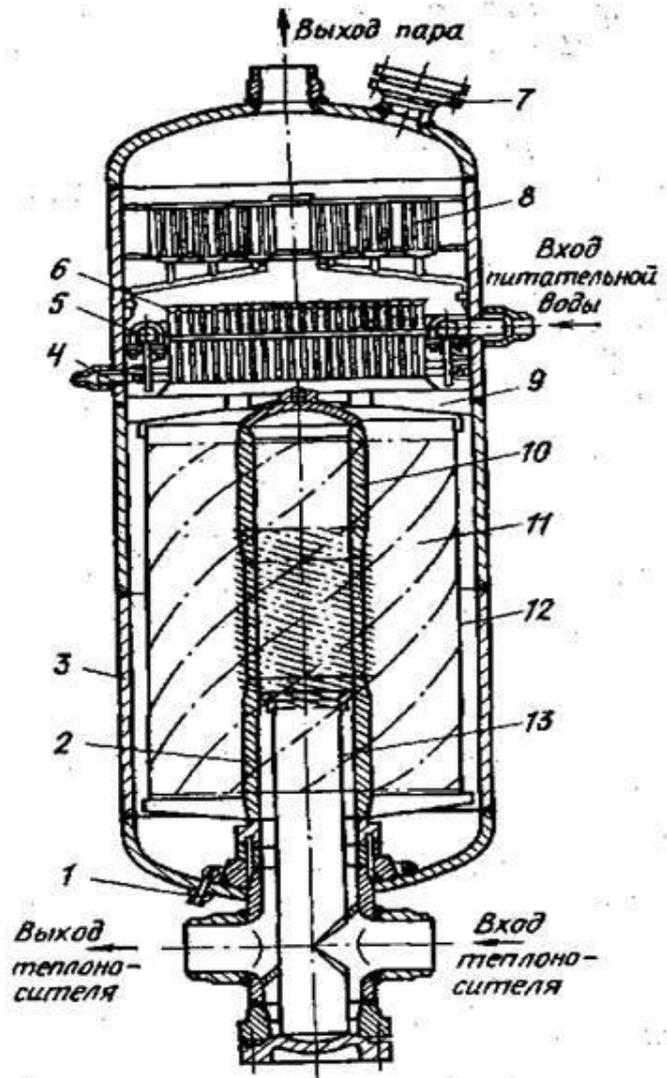


Рис. 19.5. Вертикальный парогенератор АЭС с ВВЭР:
 1 — штуцер дренажа и периодической продувки; 2 — собирающая камера коллектора теплоносителя; 3 — корпус; 4 — штуцер непрерывной продувки; 5 — раздающий коллектор питательной воды; 6 — циклоны; 7 — люк-лаз; 8 — вертикальные жалюзийные сепараторы; 9 — опорные пластины коллектора; 10 — раздающая камера коллектора теплоносителя; 11 — пучок труб теплопередающей поверхности; 12 — обечайка пучка труб; 13 — разделительная обечайка коллектора