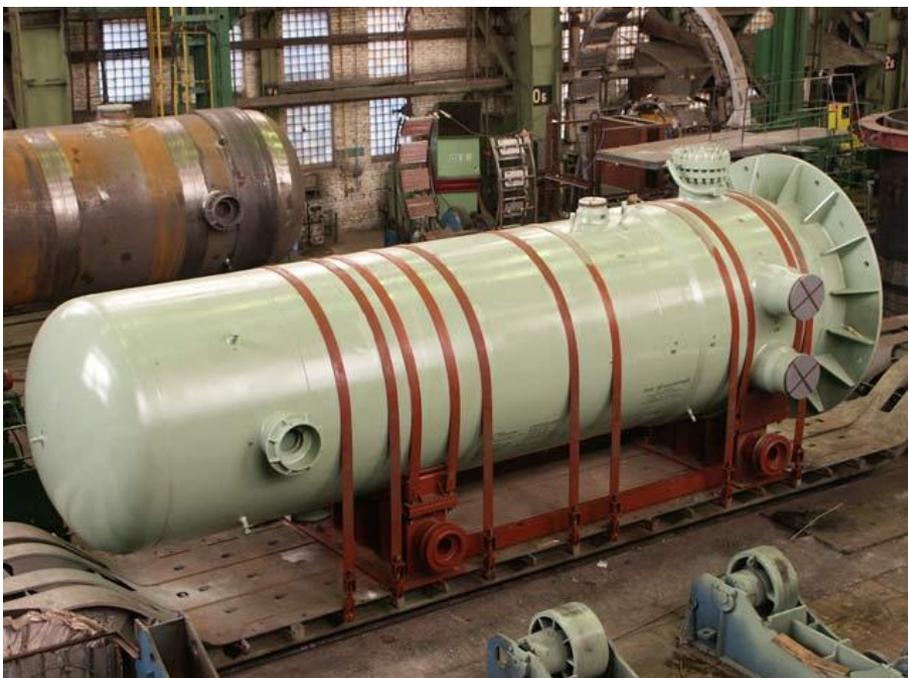


Системы регенерации тепла ЭС

Лектор: профессор каф. АТЭС Коротких А.Г.



Содержание

- Термодинамический цикл ПТУ с регенерацией тепла
- Типы регенеративных подогревателей и схемы включения
- Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Типы регенеративных подогревателей и СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ

В конденсаторе давление рабочей среды наименьшее; в парообразующем агрегате — наибольшее. Этот перепад давлений должен быть преодолен насосом. Установка на этом пути регенеративных подогревателей существенно повышает требуемый напор насоса, так как необходимо преодолеть еще и гидравлические сопротивления всех подогревателей.

Если для подачи воды в парообразующий агрегат насос установлен только после конденсатора, то все регенеративные подогреватели находятся под давлением, превышающим давление в парообразующем агрегате. Это удорожает оборудование.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

Тракт от конденсатора до парообразующего агрегата разделяют на две части: конденсатный и питательный тракты.

Между ними обычно устанавливается деаэратор. Напор **конденсатного насоса** (КН), устанавливаемого после конденсатора, равен давлению в деаэраторе, суммируемому с сопротивлением всего тракта, в том числе с сопротивлением всех регенеративных подогревателей, расположенных до деаэратора. В связи с относительно низким давлением для этих подогревателей их называют **подогревателями низкого давления** (ПНД).

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

После **деаэратора** (Д) устанавливается **питательный насос** (ПН), напор которого равен перепаду давления между парообразующим агрегатом и деаэратором, суммируемому с сопротивлением всего тракта, в том числе с сопротивлениями всех регенеративных подогревателей, расположенных после деаэратора. В связи с относительно высоким давлением для этих подогревателей их называют **подогревателями высокого давления** (ПВД).

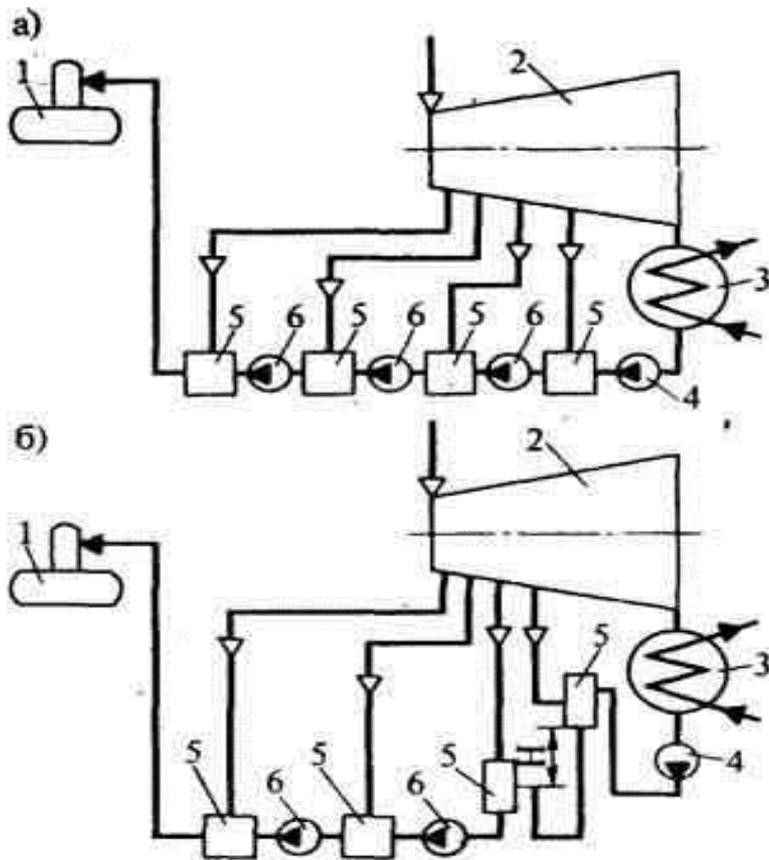
Обычно число ПНД не более пяти, а число ПВД — не более трех.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

Смешивающие подогреватели имеют тот недостаток, что давление воды в каждом из них равно давлению отборных паров и потому отличается друг от друга.

Это означает необходимость применения соответствующего числа насосов для подачи воды в последующие подогреватели или использование гидростатического столба ***H*** для повышения давления, как это показано на рис. 1 для ПНД.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения



а — только с перекачивающими насосами;
б — с перекачивающими насосами и
частичным самотечным движением воды;

- 1** — деаэратор;
- 2** — цилиндр низкого давления турбины;
- 3** — конденсатор;
- 4** — конденсатный насос;
- 5** — ПНД смешивающего типа;
- 6** — перекачивающий насос

Рис. 1 Регенеративные схемы со
смешивающими ПНД.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

В связи с этим для ПНД в основном, а для ПВД как единственное решение используют **регенеративные подогреватели поверхностного типа**. Для них **давление воды по тракту не зависит от давления пара в отборах турбины**, при этом достаточно одного насоса для прокачки воды через несколько подогревателей.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

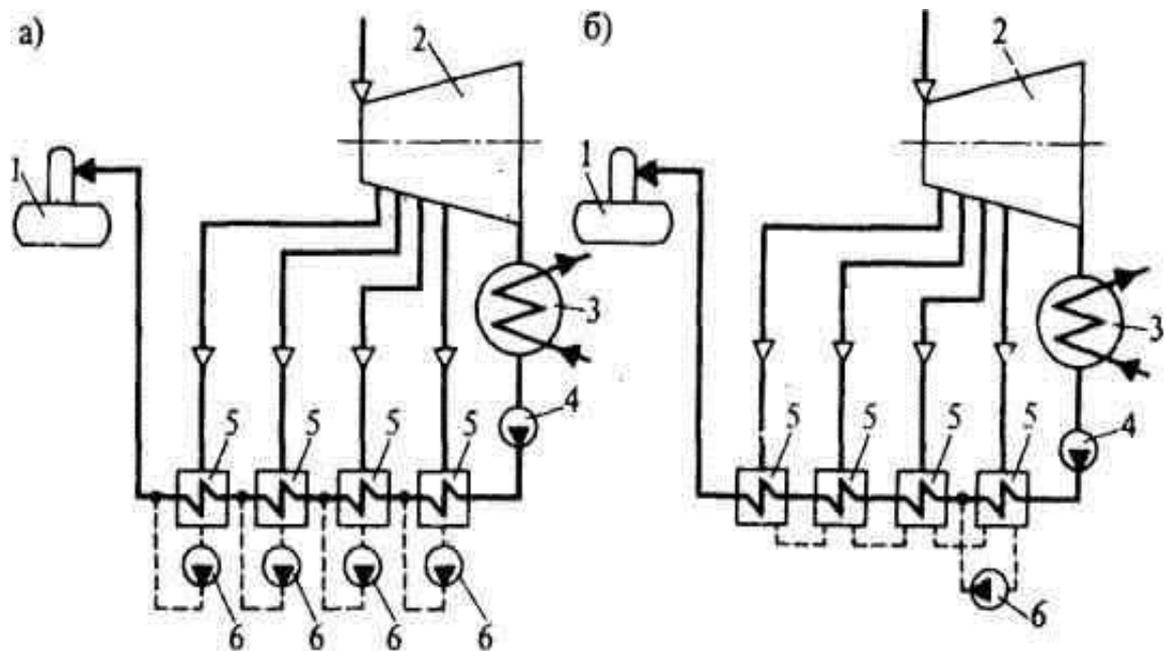


Рис. 2 Регенеративные
схемы с поверхностными
ПНД.

- 1** — деаэратор;
- 2** — ЦНД турбины;
- 3** — конденсатор;
- 4** — конденсатный насос;
- 5** — ПНД поверхностного
типа;
- 6** — дренажный насос

а — с дренажными насосами;

б — с перекачивающими насосами и каскадом слива дренажей из корпусов подогревателей;

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

Схемы с поверхностными подогревателями показаны на (рис. 2). Греющие пары поступают в корпуса подогревателей; за счет нагрева воды, протекающей внутри трубок, происходит конденсация этих паров; образующийся конденсат собирается в нижней части корпусов.

Этот конденсат, иногда называемый **дренажом подогревателей, дренажными насосами** (рис. 2а) закачивается в линию основного конденсата и смешивается с потоком нагреваемого конденсата.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

Из (рис. 2б) видно, что можно сократить число дренажных насосов за счет использования каскадного слива дренажей из корпусов подогревателей, находящихся под большим давлением, в корпуса с меньшим давлением и закачкой суммарного дренажа в тракт конденсата одним насосом.

На случай аварийного выхода из строя дренажного насоса предусматривается возможность его балансирования и каскадного слива дренажей в конденсатор. В этом случае вообще отпадает необходимость в дренажном насосе.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

В связи с различием в давлениях трактов ПНД и ПВД схемы возврата в цикл дренажей греющих паров отличаются. Для ПНД используют комбинации каскадного слива с дренажными насосами, а для ПВД только каскадный слив — в деаэратор.

В условиях низких температуры и давления, то есть для ПНД, создание дренажных насосов и обеспечение их надежной работы затруднений не вызывает. Схема закачки дренажей ПНД по (рис. 2а) наиболее экономична и близка к схемам со смешивающими подогревателями, но требует нескольких насосов.

Типы регенеративных подогревателей и схемы включения

При каскадном сливе дренажей конденсат греющего пара с более высоким давлением сливается в корпус с меньшим давлением. В связи с этим происходит частичное парообразование этого конденсата и соответствующее уменьшение расхода отборного пара из турбины, что снижает экономичность регенеративного цикла.

Для предотвращения этого явления предусматривают охладители дренажей, либо в дополнение к регенеративным подогревателям применяют установку вынесенных *охладителей дренажей* (ОД).

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

При поверхностных ПНД и ПВД продукты коррозии, образующиеся в конденсатном тракте, могут отлагаться на поверхности теплообмена в парогенераторе двухконтурной АЭС и реакторе одноконтурной АЭС.

При этом возможно ухудшение теплоотвода и снижение тепловой экономичности и надежности работы АЭС. С наибольшей интенсивностью коррозия протекает в области температуры, характерной для конденсатного тракта. В связи с этим для теплообменной поверхности ПНД используют материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью. К их числу относятся латуни и нержавеющие стали.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Латуни дешевы и обладают высокой теплопроводностью. Однако поступление в воду оксидов меди, составляющей основу латуней, недопустимо для одноконтурной АЭС. Поэтому латунные ПНД могут использоваться только в турбинных установках двухконтурной АЭС.

Нержавеющие аустенитные стали дороги и обладают низкой теплопроводностью, поэтому их применение для ПНД ограничивается турбинными установками одноконтурной АЭС.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

В области температуры, характерной для питательного тракта, коррозия конструкционных материалов протекает с существенно меньшей интенсивностью. Поэтому для ПВД используют дешевые углеродистые стали, принимая для них $\delta t = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для всех конструктивных схем поверхностных регенеративных подогревателей характерны следующие общие положения:

- теплообменная поверхность располагается в корпусе.
- среда с большим давлением (конденсат, питательная вода) направляется внутрь труб малого диаметра.

Обозначение регенеративных подогревателей

место подогревателя и его тип (низкого давления – ПН, низкого давления смешивающего типа – ПНС, высокого давления - ПВ)

площадь поверхности теплообмена, м²

давление нагреваемой среды, кгс/см²

давление греющего пара, кгс/см²

Номер модификации

буква А – применимость для атомных электростанций
нж – трубки из нержавеющей стали

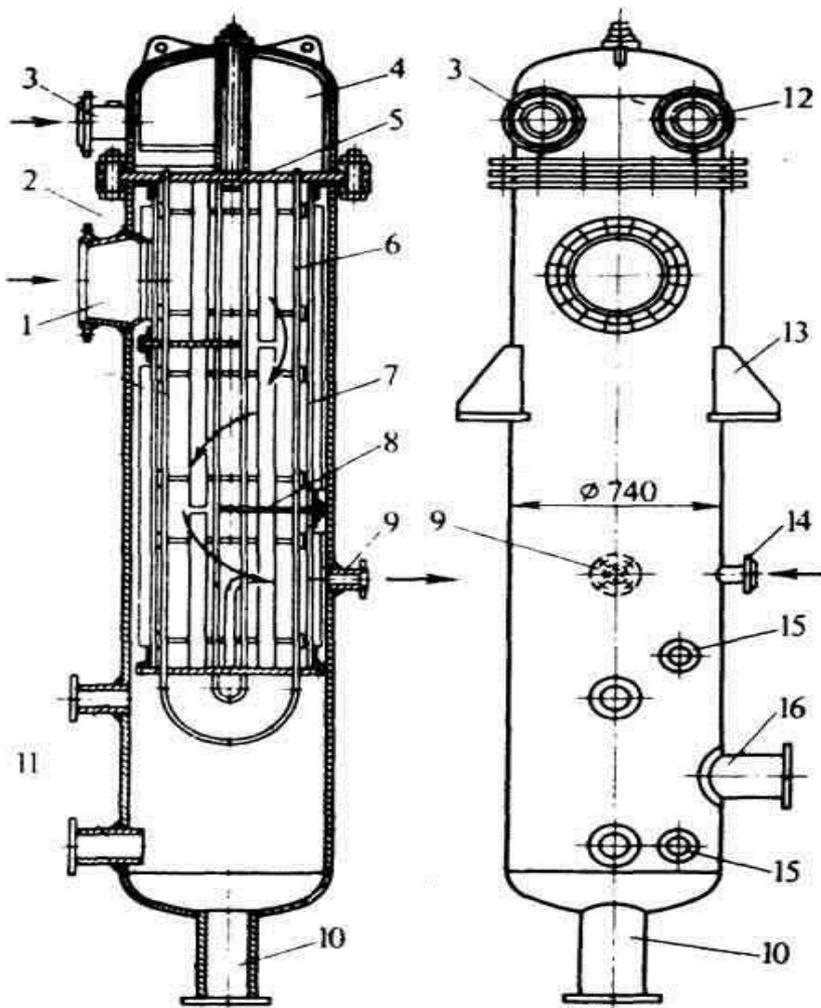
ПН	400	26	7	I
ПН	800	29	7	IA
ПНС	800	1,0	2	нж
ПВ	1600	380		

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

- греющий пар в регенеративных подогревателях всегда направляется сверху вниз.
- змеевиковая поверхность нагрева подогревателей выполняется наиболее компактно.
- трубки отвода неконденсирующихся газов из корпуса выполняются из нержавеющей аустенитных сталей.
- за счет большего давления нагреваемой среды (конденсат, питательная вода) обеспечивается не вскипание воды в подогревателях и отсутствие гидравлических ударов.



Материалы и конструкции ПНД и ПВД



- 1** — ввод греющего пара;
- 2** — защитный лист;
- 3** — вход нагреваемого конденсата;
- 4** — водяная камера;
- 5** — трубная доска;
- 6** — латунные U-образные трубки;
- 7** — обечайка — каркас для трубок;
- 8** — направляющие перегородки;
- 9** — патрубок отсоса воздуха;
- 10** — сливной трубопровод конденсата греющего пара;
- 11** — отводы конденсата в импульсную камеру сигнализатора уровня;
- 12** — выходной патрубок основного конденсата;
- 13** — опоры корпуса;
- 14** — подвод паровоздушной смеси из соседнего подогревателя;
- 15** — отводы к водоуказательному прибору;
- 16** — приемный патрубок конденсата греющего пара;

Рис. 3. Регенеративный теплообменник с трубной системой из латуни.

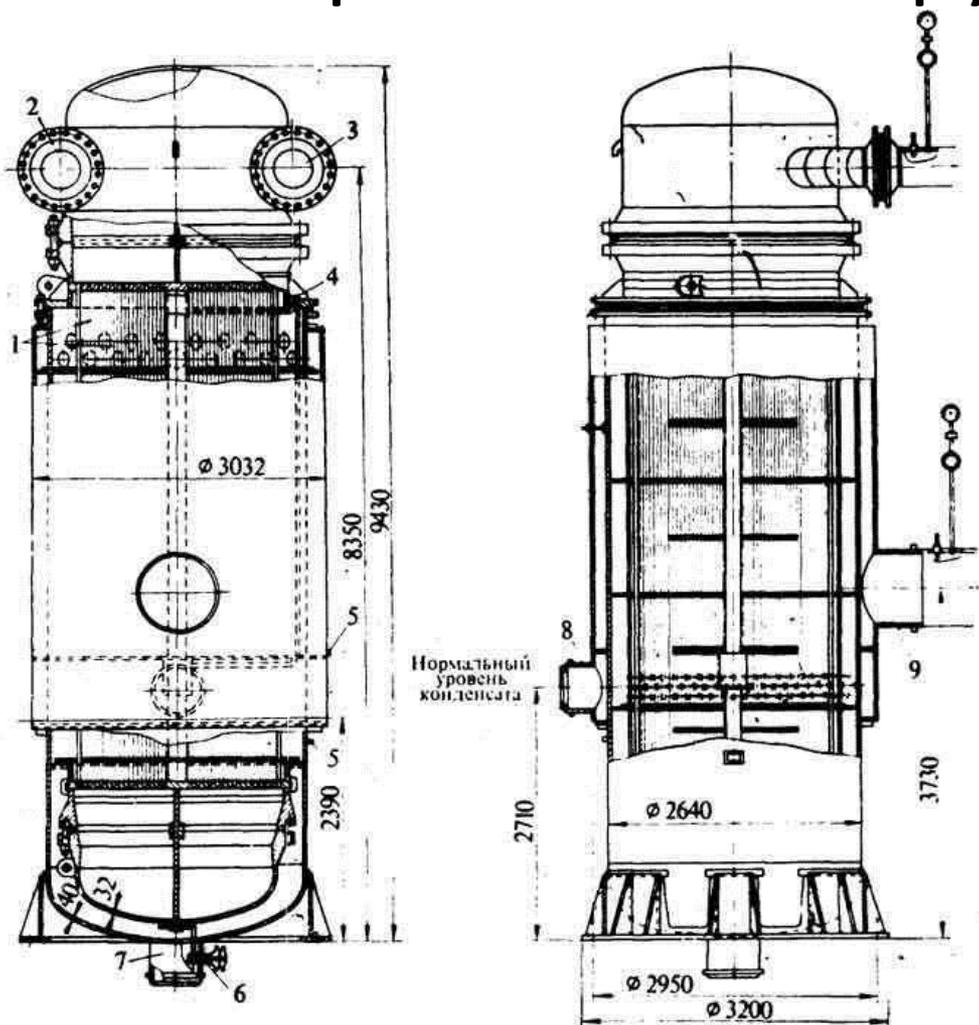
Материалы и конструкции ПНД и ПВД

На (рис. 3) представлена конструкция латунного ПНД.

Незначительные рабочие давления позволили сделать этот подогреватель с фланцем и трубной доской (5), что упрощает как его конструкцию, так и эксплуатацию. В цилиндрическом корпусе размещается поверхность нагрева, состоящая из U-образных трубок (6), завальцованных в трубной доске (5) и скрепленных обечайкой — каркасом (7), придающим пучку жесткость и предохраняющим его от вибраций. Водяная камера (4) разделена перегородкой на две части.

Нагреваемая вода входит через патрубок (3), проходит по трубкам сначала вниз, а затем вверх и выходит через патрубок (12). Скорость воды в трубках принимается в пределах 1,5 — 3 м/с. Греющий пар подводится через штуцер (1).

Материалы и конструкции ПНД и ПВД



- 1** — трубная система;
- 2** — вход воды;
- 3** — выход воды;
- 4** — отсос парогазовой смеси;
- 5** — к водоуказательному прибору;
- 6** — опорожнение трубной системы;
- 7** — выход конденсата греющего пара;
- 8** — впуск конденсата греющего пара соседнего подогревателя;
- 9** — вход греющего пара конденсата;

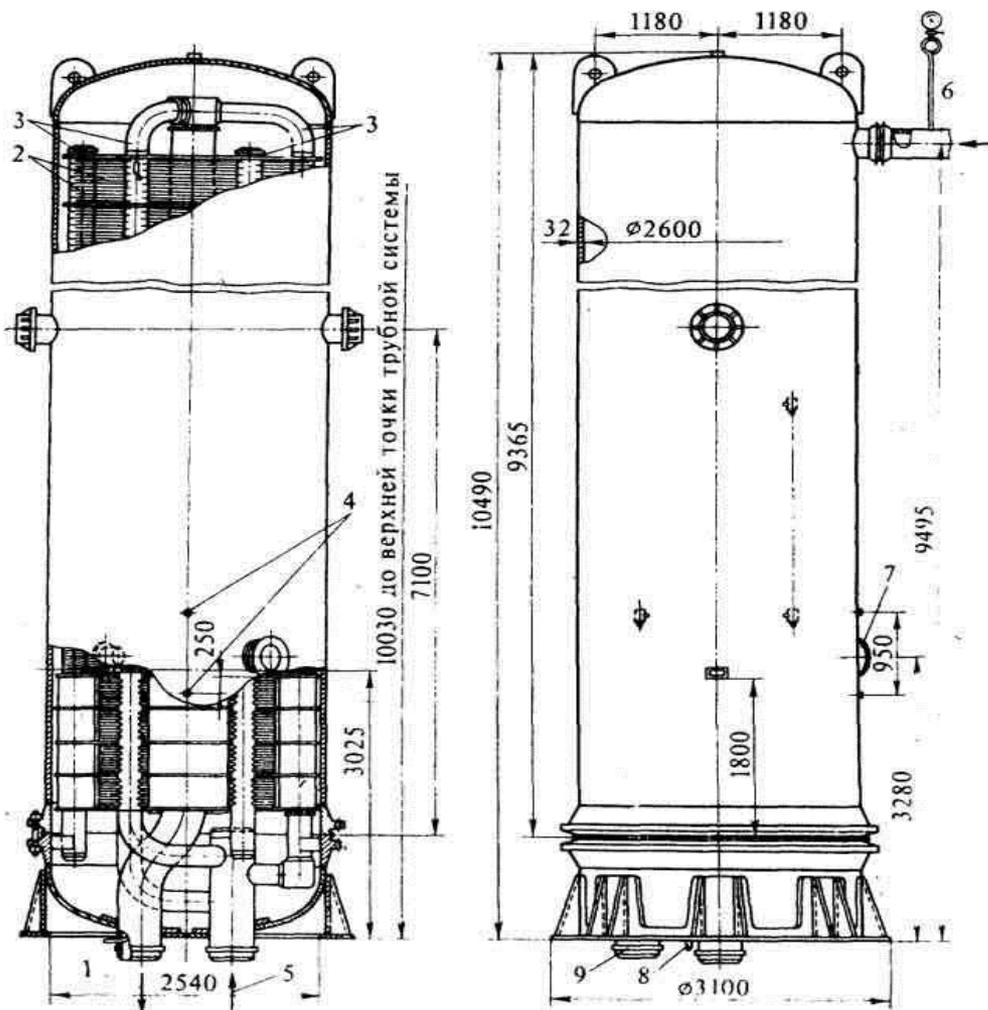
Рис. 4. Регенеративный ПНД с трубной системой из аустенитной нержавеющей стали.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Отсос паровоздушной смеси из данного подогревателя производится на том же уровне через патрубок (9). Корпус подогревателя имеет опоры для подвески к металлическим конструкциям или установки на бетонном основании у турбины. Данная конструкция ПНД не позволяет охладить конденсат греющего пара ниже температуры насыщения.

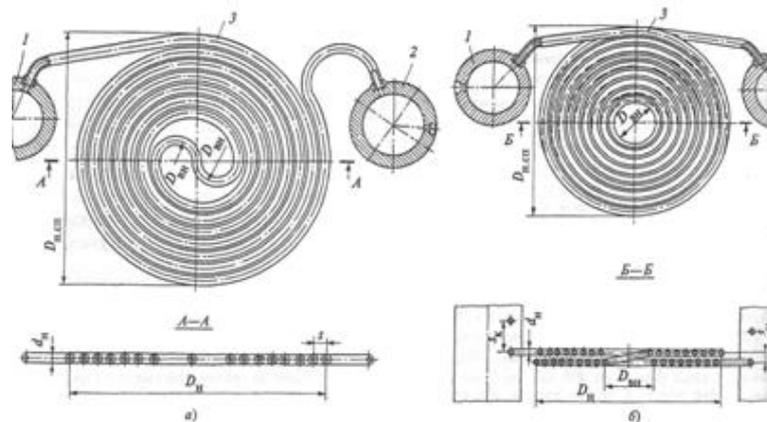
Конструктивная схема регенеративного ПНД с трубной системой, разработанная специально из нержавеющей аустенитной стали типа **ОХ18Н10Т**, представлена на (рис. 5).

Материалы и конструкции ПНД и ПВД



- 1** — выход питательной воды;
- 2** — трубная система;
- 3** — коллекторы трубной системы;
- 4** — к водоуказательному прибору;
- 5** — вход питательной воды;
- 6** — вход греющего пара;
- 7** — впуск конденсата греющего пара соседнего подогревателя;
- 8** — отсос парогазовой смеси;
- 9** — выход конденсата греющего пара;

Рис. 5. Регенеративный подогреватель высокого давления коллекторно-спирального типа с трубной системой из углеродистой стали.



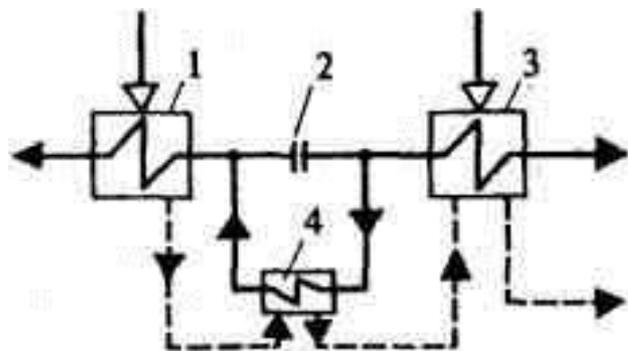
Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Преимущество конструкции регенеративного подогревателя, приведенного на (рис. 5), — возможность замены любой из спиралей и четко организованное противоточное движение греющей и обогреваемой сред.

В нижней части этого ПВД организовано противоточное движение греющей и обогреваемой сред, также в нижней части организовано охлаждение конденсата ниже температуры кипения, отвечающей давлению греющего пара.

В связи с этим невозможно вскипание конденсата греющего пара при его сливе в предыдущий ПВД. При этом исключается снижение тепловой экономичности за счет уменьшения расхода греющего пара в этот ПВД.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД



- 1,3** — пара подогреватель;
- 2** — дроссельная шайба;
- 4** — охладитель дренажа;

Рис. 6. Вынесенный охладитель дренажа ПНД.

Из (рис. 6) видно, что конденсат греющего пара подогревателя (1) по пути в предыдущий подогреватель (3) проходит через охладитель дренажа (4). На основном потоке воды устанавливают дроссельную шайбу (2), в связи с чем часть воды после подогревателя (3) поступает в охладитель дренажа и затем соединяется с общим потоком, направляемым в подогреватель (1).

Материалы и конструкции ПНД и ПВХ

Установка охладителей дренажа может быть предусмотрена и на полный расход воды. Охладители дренажа не поставляют комплектно с ПНД, так как их устанавливают в зависимости от схемы откачки дренажей подогревателей.

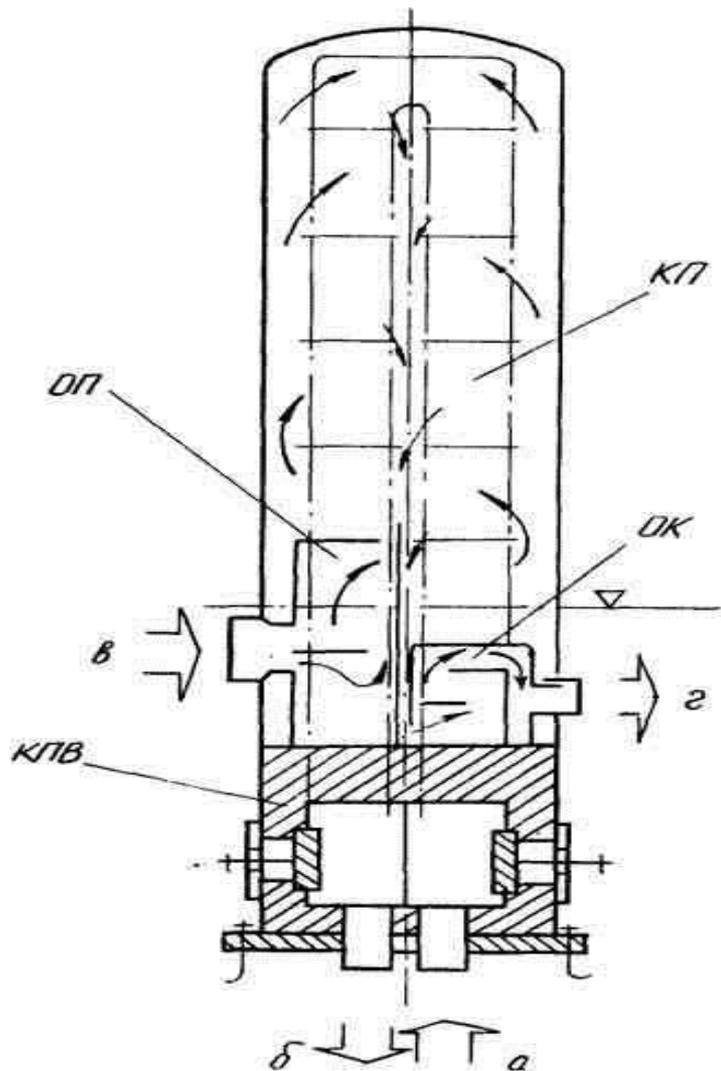
На дренажах, закачиваемых в конденсатный трубопровод, устанавливать их незачем, так как охлаждение дренажа повышает экономичность, только если конденсат греющего пара сливается в предшествующий ПНД.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Исследования работы ПВД показывают, что необходимо отказаться от коллекторно-спирального типа ПВД и перейти к иному типу конструкции ПВД, причем тепло-обменные трубки следовало применять диаметром не $32 \times 4,5$, а $22 \times 3,5$, и обязательно мерные; сталь должна быть качественная перлитная, а не простая углеродистая.

Целесообразность уменьшения диаметра трубок была проверена на опытах с ПВД. Кроме того, был выполнен проект **камерной конструкции ПВД**, а также особая навивка, позволяющая увеличить заполнение ПВД и уменьшить его вибрацию. Образец такого ПВД представлен на (рис. 7).

Материалы и конструкции ПНД и ПВД



- а, б** — вход и выход питательной воды;
- в** — вход пара;
- г** — выход конденсата
- КПВ** — камера питательной воды;
- КП** — конденсационная поверхность;
- ОП и КП** — охладители пара и конденсата;

Рис. 7. Конструктивная схема вертикального ПВД камерного типа.

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

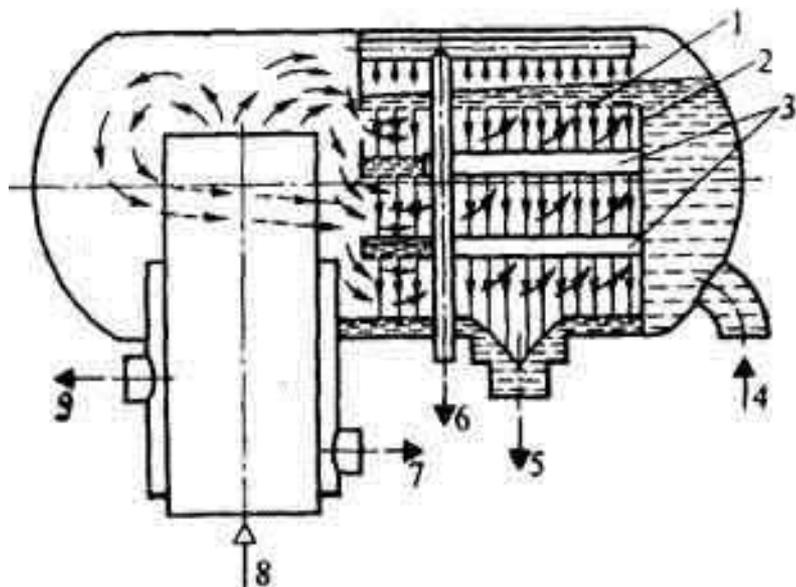


Рис. 8 Конструктивная схема смешивающего регенеративного подогревателя.

- 1** — перфорированный щит;
- 2** — глухой щит;
- 3** — бортики;
- 4** — патрубок;
- 5** — штуцер;
- 6** — патрубок для отсоса паровоздушной смеси;
- 7** — патрубок для аварийного сброса конденсата;
- 8** — поступление греющего пара;
- 9** — штуцер отводящий пар и выделившееся газы;

Материалы и конструкции ПНД и ПВХ

Конденсат поступает через патрубок (4) и глухим щитом (2) направляется на верхний перфорированный щит (1). Пройдя через него, он струйками стекает на два расположенных ниже таких же перфорированных щита.

Продаэрированный конденсат отводится через штуцер (5), а выделившиеся газы вместе с некоторым количеством пара отводятся через штуцер (9). Греющий пар поступает по линии (8) и направляется под перфорированные щиты.

В двух нижних перфорированных щитах в центральной части на большой длине сделаны прорезы для прохода пара под выше расположенный щит. Эти прорезы снабжены бортиками (3) для того, чтобы вода не поступала в них и не мешала свободному прохождению пара. Отсос паровоздушной смеси производится через патрубок (6); для аварийного сброса конденсата предусмотрен патрубок (7).

Материалы и конструкции ПНД и ПВД

Важным преимуществом смешивающих подогревателей является возможное отсутствие теплообменной поверхности, коррозия которой могла бы вызвать загрязнение конденсата.

Именно в связи с этим в некоторых проектах одноконтурной АЭС предполагалось первый и второй или только второй ПНД выполнять смешивающими, а остальные — поверхностными. Следует иметь в виду, что один смешивающий подогреватель пока всегда присутствует в регенеративных системах паротурбинных установок — это деаэратор, устанавливаемый в конце конденсатного тракта.

Автоматическое регулирование уровня конденсата

- Каждый из РП обеспечивается комплектом арматуры автоматического регулирования и защиты по верхнему предельному уровню конденсата. Аппаратура автоматического регулирования поддерживает нормальный уровень конденсата в корпусе, выпускает избыток конденсата в дренажную линию, не допуская при этом проскоков пара. Эта аппаратура также включает автоматическое защитное устройство, предохраняющее корпус подогревателя от переполнения водой. Повышение уровня в РП вследствие разрыва трубок может привести к серьезным авариям. Прежде всего вода, заполнив корпус подогревателя, через линию регенеративного отбора может попасть в турбину, вызвав тяжелые поломки лопаточного аппарата.