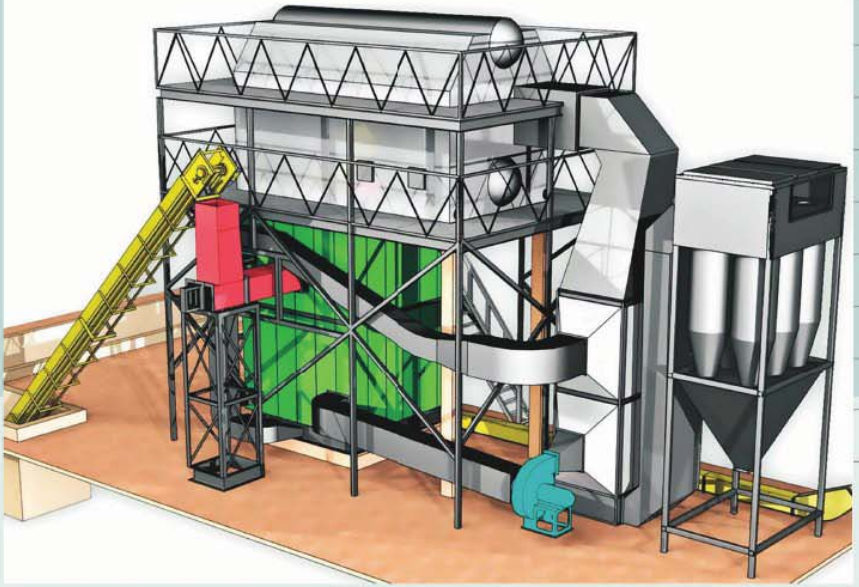
КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ



«Инфра-Инженерия»

2-е издание

Е. В. Барочкин
В. Н. Виноградов
А. Е. Барочкин

УДК 621.18
ББК 31.361
Б24

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина»

Р е ц е н з е н т ы :
начальник отдела испытаний и наладки энергетического оборудования ЗАО «Ивэнергосервис» *В. К. Макаронов*;
кандидат технических наук, профессор (ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина») *В. И. Субботин*

Барочкин, Е. В.

Б24 Котельные установки : учебное пособие / Е. В. Барочкин, В. Н. Виноградов, А. Е. Барочкин ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Е. В. Барочкина. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 440 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2216-1

Рассмотрено устройство парового котла, показана взаимосвязь основных элементов котельной установки. Даны сведения о составе органического топлива, характеристиках горелочных устройств. Описаны процессы подготовки твердого топлива к сжиганию, режимы и методы получения чистого пара в барабанных котельных агрегатах.

Для студентов тепло- и электроэнергетических, а также энергомашиностроительных направлений подготовки. Может быть полезно инженерам-теплоэнергетикам.

УДК 621.18
ББК 31.361

ISBN 978-5-9729-2216-1 © Барочкин Е. В., Виноградов В. Н., Барочкин А. Е., 2025
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

Глава 1.
КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

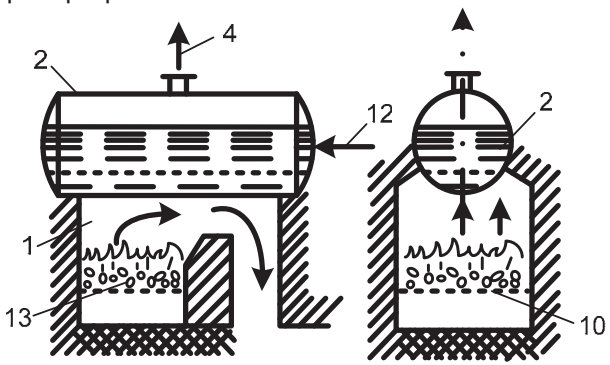
1.1. Общее устройство парового котла

Паровой котел ТЭС служит для преобразования химически связанной тепловой энергии сжигаемого топлива в потенциальную энергию перегретого пара высокого давления и температуры. Простейшим котлом, производящим насыщенный пар низкого давления, являлся *цилиндрический* котел (рис. 1.1.1, а), имевший топку с колосниковой решеткой, на которой сжигался сортированный кусковой уголь, а воздух для горения поступал снизу через решетку. Поверхностью нагрева являлась нижняя часть горизонтального цилиндра (барабана) диаметром 1,2–1,6 м, заполненного на 3/4 объема водой, которую омывали горячие газы после сжигания угля. Котел имел простую конструкцию и выдавал относительно небольшое количество насыщенного пара и имел низкий КПД из-за высокой температуры уходящих газов. Серия *водотрубных* котлов являлась результатом развития этого типа котла.

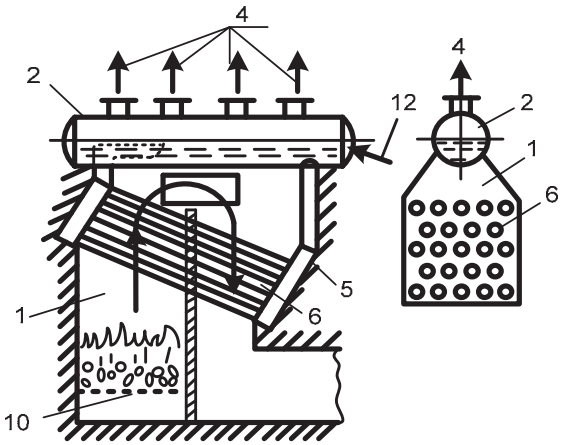
Такие котлы характеризуются увеличенной тепловоспринимающей поверхностью, выполненной в виде большого количества труб малого диаметра (80–60 мм), находящихся непосредственно в потоке горячих газов (рис. 1.1.1, б, в). В результате значительно возросли паропроизводительность котла и давление насыщенного пара, большая доля теплоты газов использовалась полезно на нагрев и испарение воды. В конструкции котлов (рис. 1.1.1, в) в опускном газоходе на выходе из теплообменной трубной поверхности была впервые установлена трубная змеевиковая поверхность для подогрева поступающей в барабан воды – *экономайзер*. В нем уходящие газы дополнительно отдают теплоту воде, имеющей достаточно низкую температуру, и удаляются из котла при температуре 150–180 °С, что приводит к повышению КПД котла. Современным типом котла являются *вертикально-водотрубные* котлы с факельным сжиганием топлива в топочной камере (рис. 1.1.1, г, д), в которых горение топлива осуществляется во взвешенном состоянии в большом свободном объеме

топочной камеры, все стены которой закрыты вертикальными трубами.

Эти трубы (топочные экраны) интенсивно обогреваются, в них нагревается и частично испаряется вода при высоком давлении. Насыщенный пар из барабана поступает в змеевиковую поверхность пароперегревателя.



а)



б)

Рис. 1.1.1, а, б. Типы водотрубных барабанных котлов:
а – цилиндрический; б – камерный горизонтально-водотрубный;
1 – топка; 2 – барабан-сепаратор; 3 – нижний барабан; 4 – выход пара;
5 – коллектор; 6 – трубы котельных пучков; 7 – экономайзер;
8 – пароперегреватель; 10 – колосниковая решетка; 11 – горелка;
12 – вход воды в котел; 13 – куски угля

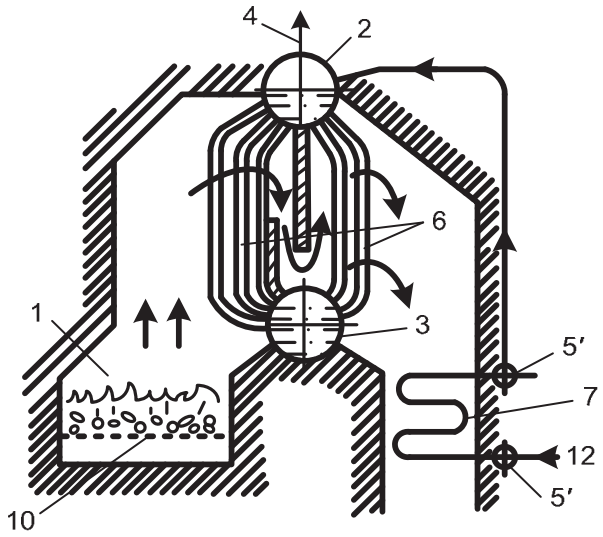


Рис. 1.1.1, в. Двухбарабанный вертикально-водотрубный котел:
1 – топка; 2 – барабан-сепаратор; 3 – нижний барабан; 4 – выход пара;
5' – коллектор; 6 – трубы котельных пучков; 7 – экономайзер;
10 – колосниковая решетка; 12 – вход воды

Подача топлива и воздуха для сжигания производится через горелки – устройства, обеспечивающие необходимое смешение топлива и воздуха в топочном объеме на выходе из горелки. При этом уголь для сжигания в объеме топки предварительно измельчается до состояния мелкой взвешенной в воздухе пыли. Для улучшения сжигания топлива воздух подогревается в опускном газоходе котла в трубчатой поверхности воздухоподогревателя, что приводит к дополнительному снижению температуры газов на выходе из котла и повышению степени сгорания топлива. Таким образом, получение перегретого пара из воды при докритическом давлении (ДКД) характеризуется последовательным протеканием следующих процессов: подогревом питательной воды до температуры насыщения или близкой к ней температуры, парообразованием и отделением насыщенного пара в барабане и, наконец, перегревом полученного пара до заданной температуры.

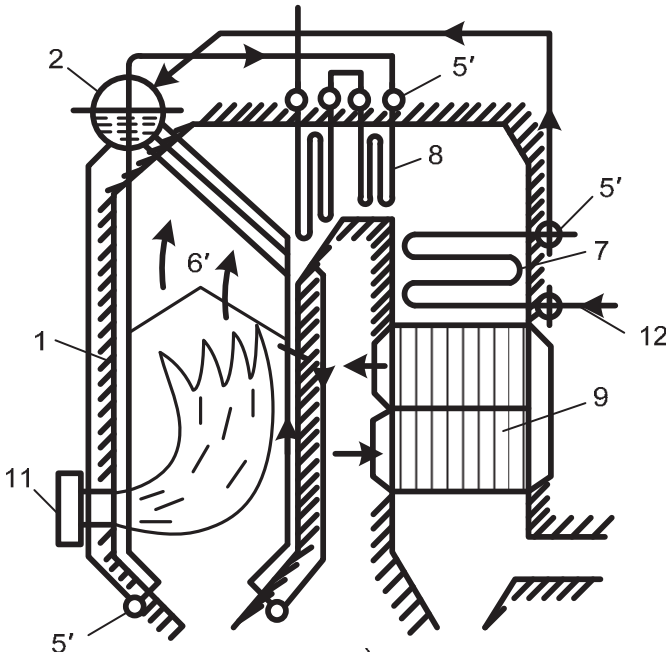


Рис. 1.1.1, г. Однобарабанный факельный вертикально-водотрубный котел: 1 – топка; 2 – барабан-сепаратор; 3 – нижний барабан; 4 – выход пара; 5 – раздающая водяная камера; 5' – коллектор; 6' – трубы настенных экранов; 7 – экономайзер; 8 – пароперегреватель; 9 – воздухоподогреватель; 10 – колосниковая решетка; 11 – горелка; 12 – вход воды в котел

Эти процессы имеют четкие границы раздела и осуществляются в трех типах теплообменников, называемых *поверхностями нагрева*: экономайзерной, испарительной (парообразующей) и пароперегревательной.

Дальнейшим развитием паровых котлов явилось создание так называемых *прямоточных котлов* (рис. 1.1.1, д). Такой котел не имеет барабана, в нем вода, а затем пароводяная смесь и пар (называемые вместе рабочей средой) последовательно проходят все поверхности нагрева котла. Здесь нет четкой границы между экономайзерной, испарительной и перегревательной поверхностями, и при переменных нагрузках происходит перераспределение их размеров. В отличие от барабанного типа котла прямо-

точные котлы могут работать и при сверхкритическом давлении рабочей среды, при котором нет процесса испарения, и исключается явление сепарации пара от воды. Таким образом, при сверхкритическом давлении (СКД) нет необходимости в барабане-сепараторе.

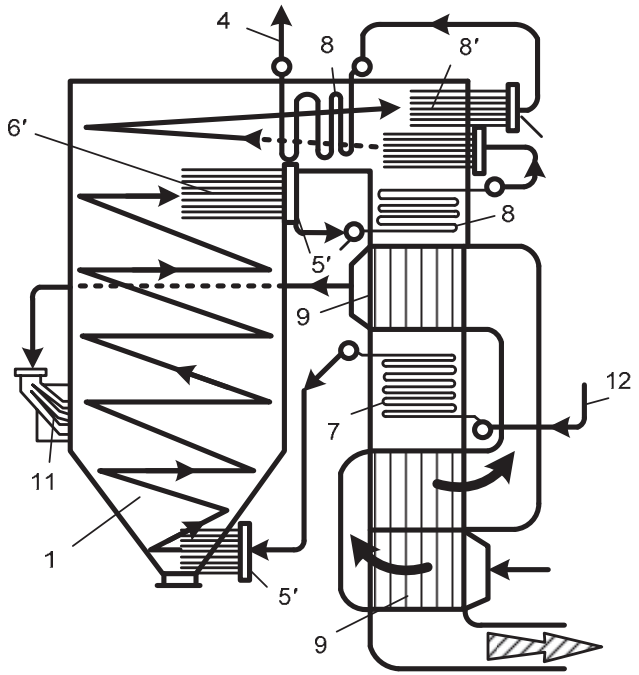


Рис. 1.1.1, д. Прямоточный водотрубный котел: 1 – топка; 4 – выход пара; 5' – коллектор; 6' – трубы настенных экранов 7 – экономайзер; 8 – пароперегреватель; 8' – настенный ленточный пароперегреватель; 9 – воздухоподогреватель; 11 – горелка; 12 – вход воды в котел

В целях непрерывного отвода теплоты и обеспечения нормального температурного режима металла поверхностей нагрева рабочая среда внутри труб – вода в экономайзере, пароводяная смесь в парообразующих трубах (или среда переменных теплофизических характеристик при СКД в зоне фазового перехода (ЗФП) и перегретый пар в пароперегревателе – движется непрерывно.

По конструкции типовой паровой котел чаще всего имеет П-образный профиль, в котором выделяются следующие три основных элемента (газохода):

• *топочная камера (топка)*, в которой во взвешенном состоянии сжигается органическое топливо и создается наиболее высокая температура продуктов сгорания. Тепловоспринимающие поверхности в виде труб (топочные экраны) расположены на ограждающих камеру стенах из огнеупорных материалов и получают теплоту из газового объема за счет радиации (радиационный теплообмен);

• *горизонтальный газоход*, где движение газов от подъемного изменяется на горизонтальное. В объеме этого газохода располагаются поверхности пароперегревателя, в которых имеет место вначале (на выходе из топки) радиационно-конвективный, а затем в основном конвективный теплообмен между газовыми продуктами сгорания (газами) и рабочей средой внутри труб;

• *конвективная шахта*, где газы имеют опускное движение, а объем шахты заполнен плотными пакетами поверхностей промежуточного пароперегревателя и экономайзера. Здесь развит конвективный теплообмен.

В нижней части конвективной шахты часто располагают поверхность воздухоподогревателя. Эта поверхность обеспечивает более глубокое охлаждение газов перед их удалением в окружающую среду и нагрев воздуха, необходимый для интенсивного горения топлива и его полного сжигания за короткое время пребывания газов в топке. В котлах большой мощности воздухоподогреватель выносят за пределы опускной конвективной шахты и выполняют другой (более компактной) конструкции в виде вращающегося на оси плоского цилиндра с внутренней теплообменной поверхностью в форме тонких пластин (регенеративный вращающийся воздухоподогреватель).

Тепловосприятие рабочей среды в поверхностях нагрева, расположенных в указанных газоходах котла, распределяется следующим образом: в экранах топочной камеры – 45–50 %, в горизонтальном газоходе – около 20 %, в конвективной шахте – 30–35 %, в том числе тепловосприятие воздуха в воздухоподогревателе составляет около 10 % общего полезного тепловосприятия от газового потока. Таким образом, наибольшее количество теплоты рабочая среда получает в поверхностях нагрева, расположенных в топке котла.

1.2. Принципы получения пара в паровых котлах

В основу работы парового котла положен принцип непрерывного отвода теплоты, выделившейся при сгорании топлива в топке, к теплоносителю. Передача теплоты от продуктов сгорания топлива к теплоносителю происходит в системе теплообменников трубчатой конструкции, называемых поверхностями нагрева. Для непрерывного отвода теплоты необходимо организовать постоянное движение теплоносителя. Как правило, теплоноситель движется внутри труб, а продукты сгорания омывают трубки теплообменников снаружи. В зависимости от способа организации движения теплоносителя паровые котлы подразделяют на прямоточные, с естественной циркуляцией и котлы с принудительной циркуляцией (рис. 1.2.1, а, б, в).

Движение теплоносителя в экономайзере и пароперегревателе в паровых котлах с естественной и принудительной циркуляцией организуют одинаково: через экономайзер вода прокачивается питательным насосом, а движение пара через пароперегреватель осуществляется за счет разности давлений пара в барабане котла и на выходе из пароперегревателя.

Особенностью паровых котлов с естественной циркуляцией является то, что поступившая вода превращается в пар лишь после многократного прохождения через циркуляционный контур. Как правило, в современных котлах за один цикл вода в контуре испаряется на 3–20 %. Таким образом, количество движущейся в контуре воды в несколько раз больше образующегося пара (рис. 1.2.1, а). Отношение расхода циркулирующей в контуре воды $G_в$ к расходу образовавшегося пара $G_п$ называется *кратностью циркуляции* $k_ц$:

$$k_ц = \frac{G_в}{G_п}.$$

В паровых котлах с естественной циркуляцией величина $k_ц$ составляет 5–30.

Движущий напор в котлах с естественной циркуляцией обычно не превышает 0,1 МПа, и этого достаточно, чтобы возникло и существовало движение в циркуляционном контуре, парообразующие трубы которого расположены вертикально.

Существуют конструкции паровых котлов, в которых парогенерирующие трубы располагаются горизонтально или слабонаклонно (например, судовые паровые котлы). При таком расположении гидравлическое сопротивление контура возрастает

настолько, что движущегося напора естественной циркуляции недостаточно для организации движения воды и пароводяной смеси.

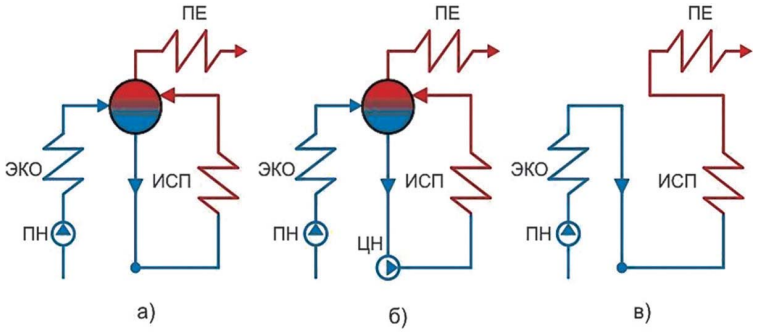


Рис. 1.2.1. Схемы пароводяных трактов котлов:
а – схема с естественной циркуляцией; б – схема с многократной принудительной циркуляцией; в – прямоточная схема

В этом случае движение теплоносителя осуществляется циркуляционным насосом, включенным в контур циркуляции. Такие котлы называются котлами с принудительной циркуляцией (рис. 1.2.1, б). Кратность циркуляции в них $k_ц$ = 3–10.

Характерной особенностью котлов с естественной и принудительной циркуляцией является наличие барабана, в котором происходит разделение пароводяной смеси на пар и воду. Поэтому эти котлы имеют общее название – *барабанные*.

При давлении, равном критическому и выше его, разделение пароводяной смеси на пар и воду невозможно, поэтому барабанные котлы могут работать при давлении меньше критического. Обычно давление, при котором работают эти котлы, не превышает 14 МПа, а их паропроизводительность, как правило, не более 670 т/ч.

Пар сверхкритических параметров получают в прямоточных котлах (рис. 1.2.1, в). Особенностью таких котлов является отсутствие замкнутого контура циркуляции в парообразующей зоне, а также барабана как элемента этого контура. Весь пароводяной тракт прямоточного котла представляет собой разомкнутую гидравлическую систему, состоящую из последовательно соединенных экономайзерной, парообразующей и

пароперегревательной зон. Рабочее тело проходит через все поверхности нагрева однократно (кратность циркуляции $k_ц$ = 1).

Обычно прямоточные котлы имеют на выходе давление пара 25 МПа и паропроизводительность от 1000 до 3 950 т/ч. Следует отметить, что прямоточные котлы сверхкритических параметров применяются только на мощных ТЭС и работают совместно по блочной схеме с турбинами мощностью 300, 500, 800, и 1200 МВт.

Барабанные паровые котлы с естественной циркуляцией применяются на всех остальных электростанциях и в котельных нашей страны и являются самым распространенным типом паровых котлов.

Схема пароводяного тракта барабанного парового котла приведена на рис. 1.2.2, а термодинамические процессы, происходящие в котле, проиллюстрированы в *T,s*-диаграмме (рис. 1.2.3).

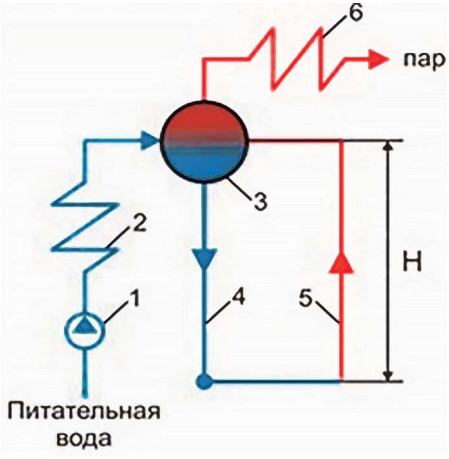


Рис. 1.2.2. Схема пароводяного тракта барабанного парового котла с естественной циркуляцией: 1 – питательный насос; 2 – экономайзер; 3 – барабан; 4 – опускные трубы; 5 – подъемные трубы; 6 – пароперегреватель

Котел с естественной циркуляцией состоит из системы обогреваемых *5* (рис. 1.2.2) и необогреваемых *4* труб, объединенных вверху барабаном *3*, а внизу коллектором, представляющих собой замкнутый контур, который принято называть циркуляционным. Этот контур заполнен до уровня, расположенного на

15–20 см ниже диаметральной плоскости барабана котла, водой, которую называют котловой. Часть барабана, заполненного водой, называют водяным объемом, а занятого паром, – паровым. Поверхность, разделяющую водяной и паровой объемы, называют зеркалом испарения. При подводе теплоты к обогреваемым трубам вода в них закипает, и они заполняются пароводяной смесью (ПВС), имеющей плотность $\rho_{см}$. Необогреваемые трубы всегда заполнены некипящей водой с плотностью $\rho_{в}$. Нижняя точка контура подвержена со стороны необогреваемых труб давлению столба жидкости $H \cdot \rho_{в}$ (рис. 1.2.2), а со стороны обогреваемых труб – давлению пароводяной смеси $H \cdot \rho_{см}$, где H – высота контура.

Вследствие того, что плотность воды больше плотности ПВС ($\rho_{в} > \rho_{см}$), в циркуляционном контуре возникает разность давлений $\Delta p_{дв} = H \cdot (\rho_{в} - \rho_{см})$, которая вызывает движение воды в нем и называется *движущим напором естественной циркуляции*.

Процесс получения перегретого пара состоит из трех этапов:

1) подогрева питательной воды до температуры кипения;

2) генерации насыщенного пара из воды;

3) перегрева сухого насыщенного пара до необходимой температуры.

Эти процессы на *T,s*-диаграмме (рис. 1.2.3) изображаются тремя изобарами: *a-b*, *b-c*, *c-d*.

В котлоагрегате подогрев воды до температуры кипения происходит в экономайзере *2* (см. рис. 1.2.3), а термодинамический процесс нагрева воды показан линией *a-b* на рис. 1.2.3, площадь под кривой *a-b* равна количеству тепловой энергии, затраченной на процесс подогрева воды, $Q_{эко}$.

Аналогично на рис. 1.2.3 показано, что процесс кипения воды и образования пара происходит в испарительной поверхности нагрева – в парообразующих трубах *5* (линия *b-c*) и площадь под этой линией равна количеству теплоты $Q_{исп}$, израсходованной на генерацию пара, а перегрев пара осуществляется в пароперегревателе *6* (кривая *c-d*) и площадь под ней равна количеству теплоты $Q_{п.п}$, необходимой для перегрева пара.

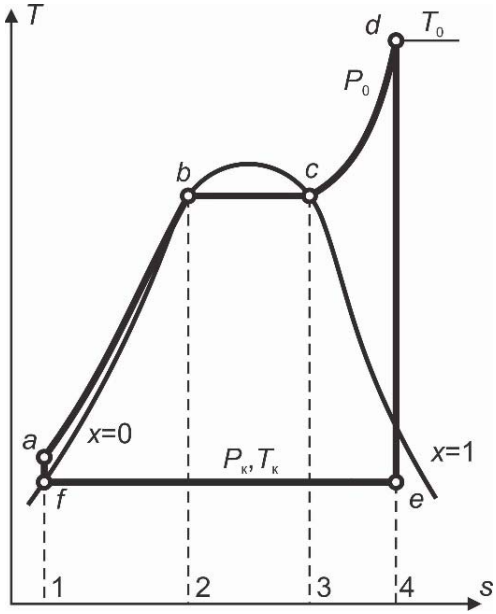


Рис. 1.2.3. Идеальный цикл Ренкина
в T,s-диаграмме

1.3. Принципиальная схема барабанного котла с естественной циркуляцией

Самые распространенные паровые котлы барабанного типа, применяемые на ТЭС, генерируют пар давлением $p_о$ = 140 кг/см^2 (13,7 МПа) и температурой $t_о$ = 545–560 °С.

Паровые котлы этого типа применяются как на электростанциях с поперечными связями, когда все котлоагрегаты работают на единую паровую магистраль, так и на ТЭС блочного типа.

Все конденсационные электростанции с блоками мощностью 200–215 МВт имеют в своем составе котлоагрегаты барабанного типа с промежуточным перегревом пара паропроизводительностью 670 т/ч.

Рассмотрим более подробно принципиальную тепловую схему барабанного котла с естественной циркуляцией без промежуточного перегрева пара (рис. 1.3.1).

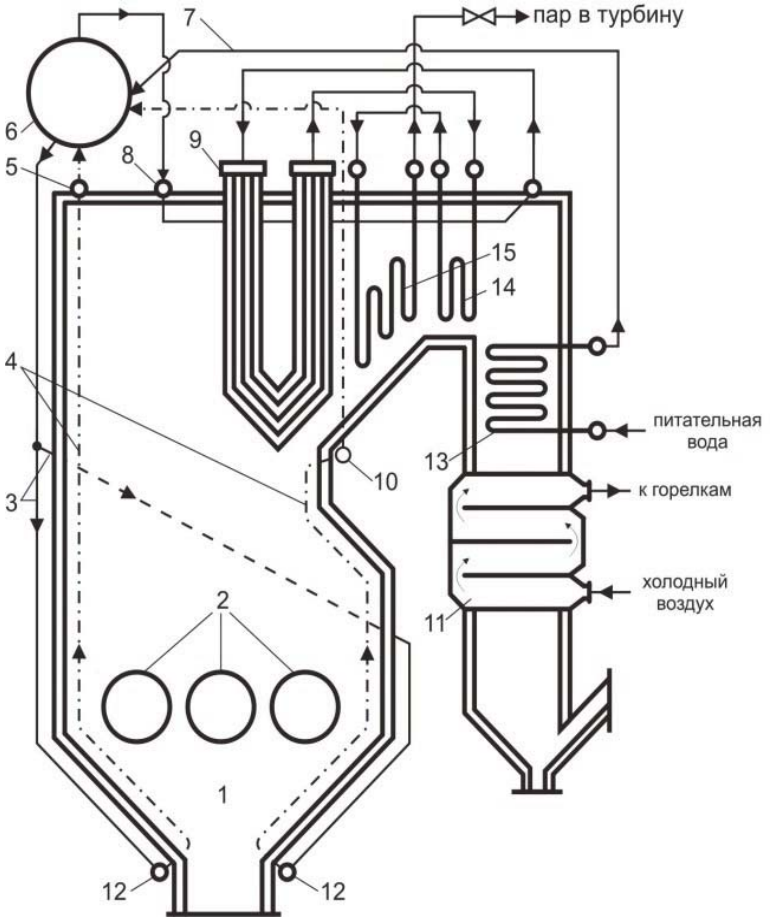


Рис. 1.3.1. Принципиальная схема барабанного парового котла:
1 – топочная камера; 2 – горелки; 3 – опускные трубы; 4 – топочные экраны; 5 – верхние коллекторы; 6 – барабан; 7 – отводящие трубы; 8 – радиационный потолочный пароперегреватель; 9 – ширмовый пароперегреватель; 10 – верхний коллектор заднего экрана; 11 – воздухоподогреватель; 12 – нижние коллекторы топочных экранов; 13 – экономайзер; 14, 15 – первая и вторая по ходу пара ступени конвективного пароперегревателя

Топливо поступает через горелки *2* в топочную камеру *1*, где происходит процесс горения и образуются продукты сгорания, которые затем проходят все поверхности нагрева котла, постепенно остывая и отдавая тепло пароводяному теплоносителю.

На выходе из кола продукты сгорания топлива имеет самую низкую температуру, которая получила название *температура уходящих газов,* $\upsilon_{ух}$, °С.

Питательная вода поступает в экономайзер *13*, где нагревается до температуры, близкой к температуре насыщения. Из экономайзера по отводящим трубам *7* питательная вода подается в барабан *6*. Из барабана по опускным трубам *3* вода поступает в нижние коллекторы *12*, откуда направляется в подъемные трубы топочных экранов *4*.

Пароводяная смесь, образующаяся в подъемных трубах, собирается в верхних коллекторах *5* и поступает по отводящим трубам в барабан, где происходит отделение пара от воды.

Сухой насыщенный пар из барабана котла поступает на перегрев сначала в радиационный потолочный пароперегреватель *8* и далее последовательно проходит ширмовый пароперегреватель *9*, первую *15* и вторую *14* ступени конвективного пароперегревателя, после чего, достигнув температуры $t_{пп}$ = 545 – 560 °С, направляется к паровой турбине.

Холодный воздух поступает в трубчатый воздухоподогреватель *11*, нагревается в нём в зависимости от вида сжигаемого топлива до температуры $t_{гв}$ = 230–350 °С и направляется к горелкам.

В горелках горячий воздух смешивается с топливом, образует топливно-воздушную смесь, которая поступает в топку котла для горения.

1.4. Схема прямоточного котла СКД

Пар сверхкритических параметров получают в прямоточных котлах. Особенностью таких котлов является отсутствие замкнутого контура циркуляции в парообразующей зоне, а также барабана как элемента этого контура. Весь пароводяной тракт прямоточного котла представляет собой разомкнутую гидравлическую систему, состоящую из последовательно соединенных экономайзерной, парообразующей и пароперегревательной зон.

Рабочее тело проходит через все поверхности нагрева однократно ($k_{ц}$ = 1). Обычно прямоточные котлы имеют на выходе давление пара 25 МПа и паропроизводительность от 1 000 до 3 950 т/ч. Следует отметить, что прямоточные котлы сверх-

критических параметров применяются только на мощных ТЭС и работают совместно по блочной схеме с турбинами мощностью 300, 500, 800, и 1200 МВт.

Прямоточный котел характеризуется последовательным включением и однократным прохождением рабочей средой всех поверхностей нагрева. Вода, поступающая в экономайзер, с практически тем же расходом проходит одним ходом все поверхности, включая топочные экраны, полностью испаряется и затем в виде перегретого пара покидает котел и по паропроводу направляется к турбине. В такой конструкции котла при переменных режимах работы изменяются размеры зон нагрева и испарения воды и нагрева пара, что влияет на выходные параметры пара (прежде всего, его температуру). Известная стабилизация параметров обеспечивается поддержанием постоянного соотношения между расходом топлива (тепловыделением) и расходом воды. Ввиду этого прямоточный котел требует применения более совершенной быстродействующей системы автоматического регулирования.

В паровых котлах сверхкритического давления переход рабочей среды из состояния воды в состояние пара по мере получения теплоты характеризуется плавным изменением плотности, теплоемкости и других физических показателей среды, которые постепенно приближаются к характеристикам пара.

Эта зона преобразования воды в пар называется *зоной фазового перехода (ЗФП)*.

По своим задачам ЗФП соответствует области парообразования при докритическом давлении пара. При движении воды и пара возникают гидравлические сопротивления, которые преодолеваются избыточным напором питательного насоса. Приближенно полное гидравлическое сопротивление рабочего тракта прямоточного котла СКД составляет $\Delta p_{пк} = (0{,}2 – 0{,}25)\cdot\Delta p_{пп}$, в том числе сопротивление тракта пароперегревателя – 0,1 $p_{п.п}$ и экономайзера – (0,02–0,03) $p_{п.п}$, где $p_{пп}$ – давление перегретого пара на выходе из котла.

Таким образом, если давление перегретого пара $p_{пп}$ = 25,5 МПа, то давление питательной воды на входе в котел (в экономайзер) составит $p'_{эк} = 1{,}22\ p_{п.п} = 1{,}22 \times 25{,}5 = 31{,}1$ МПа.

Компоновка поверхностей нагрева в прямоточном паровом котле показана на рис. 1.4.1. Поверхность экономайзера в конвективной шахте обеспечивает нагрев поступающей из турбинного отделения питательной воды до температуры, близкой к

температуре насыщения при рабочем давлении воды. После прохождения поверхности экономайзера питательная вода поступает в нижние коллекторы топочных экранов. Окончательный догрев воды до кипения происходит в топочном экране (радиационный экономайзер). Полное экранирование стен топочной камеры достигается в этом случае соединением нескольких самостоятельных панелей из труб, по которым организуется последовательное движение рабочей среды.

По высоте топочная камера разделяется на две или три части (на рис. 1.4.1 – две таких части) с перемешиванием потока рабочей среды в коллекторах для выравнивания температур. В каждой из частей конструкция экранирующих панелей может быть различной. В прямоточном котле экранируются панелями из пароперегревательных труб также боковые стены горизонтального газохода, поворотной камеры и потолочное перекрытие котла (на рис. 1.4.1 не показано), после чего пар в котлах большой мощности поступает в полурадиационную (ширмовую) поверхность, в которой плоские ширмы созданы большим числом труб малого диаметра в одном ряду. Затем пар поступает в конвективную змеевиковую поверхность пароперегревателя, состоящую из поперечных рядов труб, многократно согнутых U-образно, откуда перегретый пар, нагретый до требуемой температуры, направляется в паровую турбину. Питательная вода, поступающая в котел, с температурой 250–270 °С после регенеративного нагрева паром из отборов турбины и термической обработки в деаэраторе в целях удаления агрессивных газов, содержит небольшое остаточное количество взвешенных и растворенных веществ. В прямоточном котле по мере движения воды в трубах топочных экранов увеличивается паросодержание потока и, соответственно, повышается концентрация примесей в оставшейся воде, в результате чего начинается образование на внутренних стенках труб отложений, состоящих из солей жесткости и оксидов металлов, прежде всего железа.

Прямоточные котлы входят в состав паротурбинных блоков мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт. Паротурбинные блоки мощностью 210–215 МВт и все неблочные электростанции используют барабанные котлы с естественной циркуляцией.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ 3
ВВЕДЕНИЕ 5
Глава 1.
КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ 11
1.1. Общее устройство парового котла 11
1.2. Принципы получения пара в паровых котлах 17
1.3. Принципиальная схема барабанного котла
с естественной циркуляцией 21
1.4. Схема прямоточного котла СКД 23
1.5. Типоразмеры паровых котлов 26
1.6. Классификация котлоагрегатов 27
Контрольные вопросы 28
Глава 2.
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО 29
2.1. Виды топлива 29
2.1.1. Общая характеристика видов топлива 29
2.1.2. Ядерное топливо 30
2.2. Элементарный состав топлива 31
2.2.1. Элементарный состав твердого и жидкого топлив 31
2.2.2. Минеральные примеси твердого топлива 32
2.2.3. Температурные характеристики золы (плавкости) 33
2.2.4. Влага твердого топлива 34
2.2.5. Химический состав твердых и жидких топлив 35
2.2.6. Выход летучих веществ твердого топлива 37
2.3. Теплота сгорания топлива 38
2.4. Классификация энергетических топлив 39
2.5. Характеристики твердых топлив 40
2.5.1. Классификация твердого топлива по размеру кусков 40
2.5.2. Характеристики бурых углей 40
2.5.3. Характеристики каменных углей 41
2.5.4. Характеристики антрацита 41
2.5.5. Характеристики сланцев 42
2.6. Характеристики жидкого топлива (мазута) 42
2.6.1. Общая характеристика мазута 42
2.6.2. Характерные температуры мазута 44
2.7. Характеристики газового топлива 44
Контрольные вопросы 46
Глава 3.
ГОРЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА 48
3.1. Основы кинетики химических реакций 48
3.2. Горение натуральных топлив 55

3.2.1. Горение газового топлива 55
3.2.2. Горение твердого топлива 58
3.2.3. Горение жидкого топлива 63
3.3. Теоретический расход воздуха на горение 66
3.4. Теоретические объемы продуктов сгорания 68
3.5. Действительные объемы продуктов сгорания 71
3.6. Определение коэффициента избытка воздуха 74
3.7. Энтальпия воздуха и продуктов сгорания 75
Контрольные вопросы 76
Глава 4.
ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЛА 78
4.1. Общее уравнение теплового баланса котла 78
4.2. Коэффициент полезного действия парового котла и котельной установки 82
4.3. Анализ тепловых потерь при работе котла 84
4.3.1. Общие сведения о тепловых потерях 84
4.3.2. Потеря теплоты с уходящими газами 85
4.3.3. Потеря теплоты с химической неполнотой сгорания топлива 89
4.3.4. Потеря теплоты с механической неполнотой сгорания топлива 91
4.3.5. Потеря теплоты от наружного охлаждения 92
4.3.6. Потеря теплоты с физическим теплом удаляемых шлаков 94
4.3.7. Оптимизация показателей работы парового котла по сумме тепловых потерь 95
Контрольные вопросы 98
Глава 5.
КОТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА 100
5.1. Технологическая схема котельной установки 100
5.2. Тракты парового котла 103
5.3. Топливоприготовление 104
5.3.1. Подготовка твердого топлива к сжиганию 104
5.3.2. Схемы пылеприготовления 106
5.3.3. Конструкции шаровой барабанной мельницы 108
5.3.4. Быстроходные молотковые мельницы (ММ) 110
5.3.5. Валковые среднеходные мельницы (ВСМ) 115
5.3.6. Мельницы-вентиляторы (М-В) 117
5.4. Угольная пыль и её характеристики 119
5.4.1. Общие сведения 119
5.4.2. Размолоспособность топлива 119
5.4.3. Тонкость размола пыли 120

5.4.4. Взрываемость пыли 122
5.5. Подготовка к сжиганию жидкого и газообразного топлив 123
5.5.1. Подготовка к сжиганию мазута 123
5.5.2. Подготовка к сжиганию природного газа 125
5.6. Шлакоудаляющие устройства 127
5.7. Газовоздушный тракт котла 128
5.8. Компоновка парового котла 132
5.9. Специальные конструкции котлов 135
5.9.1. Котлы для сжигания углей в кипящем слое 135
5.9.2. Котлы с циркуляционным кипящим слоем 138
5.9.3. Котлы-утилизаторы 141
Контрольные вопросы 142
Глава 6.
ТОПОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА 144
6.1. Классификация топочных устройств 144
6.2. Основные размеры топочной камеры и расчетные тепловые напряжения 147
6.3. Топочные камеры и горелки для сжигания твердых топлив 152
6.3.1. Топочные камеры 152
6.3.2. Организация твердого шлакоудаления 153
6.3.3. Организация жидкого шлакоудаления 155
6.3.4. Горелочные устройства 157
6.4. Газомазутные топки и горелки 165
6.4.1. Газомазутные топки 165
6.4.2. Газомазутные горелки 168
6.4.3. Мазутные форсунки 170
6.4.4. Воздушные регистры газомазутных горелок 174
Контрольные вопросы 176
Глава 7.
ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ 177
7.1. Тепловосприятие поверхностей нагрева 177
7.2. Конструкция топочных экранов 181
7.2.1. Общая характеристика топочных экранов 181
7.2.2. Вертикальные топочные экраны котлов с естественной циркуляцией 182
7.2.3. Топочные экраны прямоточных котлов 186
7.3. Конструкции пароперегревателей и их компоновка 191
7.3.1. Виды пароперегревателей 191
7.3.2. Компоновка пароперегревателей 196

7.4. Конвективные поверхности экономайзера
и воздухоподогревателя 200
7.4.1. Водяные экономайзеры 200
7.4.2. Воздухоподогреватели 203
Контрольные вопросы 212
Глава 8.
ГИДРОДИНАМИКА ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА КОТЕЛЬНЫХ
УСТАНОВОК 213
8.1. Циркуляция рабочего тела в котле 213
8.1.1. Контур циркуляции парового котла 215
8.2. Параметры движения пароводяной смеси 217
8.3. Температурный режим испарительных поверхностей
нагрева 219
8.3.1. Режимы движения в вертикальных трубах ПВС
испарительных поверхностей нагрева парового котла 219
8.3.2. Режимы движения ПВС в горизонтальных трубах
испарительных поверхностей нагрева парового котла 225
8.3.3. Режимы движения ПВС в гибах испарительных
поверхностей нагрева парового котла 226
8.3.4. Гидродинамика паровых котлов с естественной
циркуляцией 227
8.4. Методы расчетов контуров циркуляции 229
8.4.1. Расчет простого контура 229
8.4.2. Графоаналитический метод 230
8.4.3. Итерационный метод (расчет на компьютере) 231
8.4.4. Методика расчета сложных контуров циркуляции 232
8.5. Надежность естественной циркуляции 234
8.6. Гидродинамика при принудительном движении
рабочего тела в поверхностях нагрева паровых котлов 237
8.6.1. Общая характеристика принудительного движения
рабочего тела 237
8.6.2. Гидравлическая характеристика горизонтальной
парообразующей трубы 238
8.6.3. Гидравлическая характеристика прямоточной
поверхности нагрева котла 240
8.7. Тепловая разверка 244
8.8. Коллекторный эффект 246
8.9. Пульсации потока 248
Контрольные вопросы 251
Глава 9.
ВОДНЫЙ РЕЖИМ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО ПАРА 252

9.1. Качество питательной и котловой воды в котельных агрегатах 252
9.1.1. Загрязнение питательной воды 252
9.1.2. Источники загрязнения пара 254
9.1.3. Влияние примесей на работу оборудования 255
9.2. Восполнение утечек питательной и сетевой воды 256
9.3. Водно-химические режимы (ВХР) блоков с прямоточными котлами СКД 258
9.3.1. Гидразинно-аммиачный водный режим (ГАВР) 258
9.3.2. Гидразинный водный режим (ГВР) 259
9.3.3. Нейтрально-кислородный водно-химический режим (НКВР) 260
9.3.4. Комплексонный водно-химический режим (КВР) 261
9.4. ВХР барабанных котлов 262
9.4.1. Пути поступления примесей в пароводяной тракт барабанного котла 262
9.4.2. Фосфатный режим барабанного котла 263
9.4.3. Бескоррекционный водный режим барабанного котла 263
9.4.4. Комплексонный водный режим барабанного котла 263
9.4.5. Химические промывки паровых котлов 264
9.4.6. Консервация паровых котлов 266
9.5. Внутрибарабанные устройства 267
9.5.1. Основные задачи внутрибарабанных устройств 267
9.5.2. Капельный унос воды из барабана 268
9.6. Меры борьбы с капельным уносом 273
9.6.1. Общие меры борьбы с капельным уносом 273
9.6.2. Равномерное распределение подъёмных труб по длине барабана 274
9.6.3. Устройства для обеспечения равномерного подвода пароводяной смеси в барабан котла 275
9.6.4. Применение внутрибарабанных циклонов 279
9.6.5. Установка выносных циклонов 283
9.6.6. Отделение капельной влаги из пара за счёт гравитационной и инерционной сепарации 285
9.6.7. Схема внутрибарабанных устройств для котлов низкого и среднего давлений 287
9.6.8. Схема внутрибарабанных устройств для котлов высокого и сверхвысокого давлений 289
9.7. Избирательный унос солей с паром и меры борьбы с ним 291

9.7.1. Растворимость нелетучих примесей в паре....291
9.7.2. Барботажная промывка пара....294
9.8. Организация продувок....299
9.9. Ступенчатое испарение....303
9.9.1. Одноступенчатая схема испарения барабанного котла....303
9.9.2. Двухступенчатая схема испарения барабанного котла....304
9.9.3. Трехступенчатая схема испарения барабанного котла....307
Контрольные вопросы....308
Глава 10.
ЗАГРЯЗНЕНИЕ, АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС И КОРРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛА....309
10.1. Загрязнение конвективных поверхностей нагрева....309
10.1.1. Характеристики плавления частиц золы....309
10.1.2. Виды отложений на поверхностях нагрева....310
10.1.3. Методы очистки поверхностей нагрева от наружных загрязнений....314
10.2. Абразивный износ поверхностей нагрева....316
10.3. Коррозия поверхностей нагрева....319
10.3.1. Высокотемпературная коррозия....319
10.3.2. Наружная коррозия труб экранов....319
10.3.3. Коррозия пакетов пароперегревателей....321
10.3.4. Низкотемпературная коррозия....322
10.4. Сокращение вредных выбросов в окружающую среду....326
10.4.1. Режимные методы....326
10.4.2. Установки золоулавливания....333
Контрольные вопросы....335
Глава 11.
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ....336
11.1. Эксплуатационные режимы работы паровых котлов....336
11.2. Статические характеристики парового котла в нерасчетных режимах работы....341
11.2.1. Общие положения....341
11.2.2. Зависимость характеристик работы котла от нагрузки....341
11.2.3. Зависимость характеристик работы котла от избытка воздуха и рециркуляции газов в топку....345

11.2.4. Зависимость характеристик работы котла от изменения температуры питательной воды 346
11.3. Переходные процессы в котле при изменении нагрузки 348
11.3.1. Переменные режимы работы 348
11.3.2. Маневренные характеристики барабанного котла 355
11.4. Поддержание номинальной температуры пара при пониженных нагрузках 356
11.5. Методы регулирования температуры перегретого пара 358
11.5.1. Принципы регулирования температуры перегретого пара 358
11.5.2. Регулировочные характеристики пароперегревателя 358
11.5.3. Паровое регулирование температуры перегретого пара 360
11.5.4. Конструкции впрыскивающего пароохладителя 364
11.5.5. Варианты размещения пароохладителя в тракте пароперегревателя 366
11.5.6. Паропаровой теплообменник 368
11.5.7. Методы газового регулирования 371
11.5.8. Газовое регулирование температуры перегретого пара рециркуляцией продуктов сгорания 371
11.5.9. Байпасирование продуктов сгорания 373
11.6. Режимы пуска котла 375
11.6.1. Общие положения 375
11.6.2. Пуск барабанного котла неблочной ТЭС из холодного состояния 376
11.6.3. Режимы останова котла 380
Контрольные вопросы 381
Глава 12.
ПАРОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА АЭС 383
12.1. Тепловая схема двухконтурных АЭС с реакторами ВВЭР 383
12.2. Парогенераторная установка двухконтурной АЭС 385
12.2.1. Теплотехническая схема парогенераторной установки 385
12.2.2. Конструктивная схема парогенератора 390
12.2.3. Эволюция конструктивной схемы парогенератора 395
12.2.4. Вертикальный парогенератор для АЭС с ВВЭР-1000 396

12.3. Парогенераторная установка трехконтурной АЭС.....398
12.3.1. Теплотехническая схема трехконтурной АЭС
с реактором БН-600.....398
12.3.2. Контуры циркуляции в схеме АЭС с реактором
на быстрых нейтронах типа БН-600.....400
12.3.3. Конструкция промежуточного теплообменника.....402
12.3.4. Конструктивная схема парогенератора блока
с реактором БН-600.....405
12.3.5. Тепловая схема третьего контура АЭС
с реактором БН-600 и тремя паровыми турбинами
К-200-130.....411
12.4. Теплотехническая схема трехконтурной АЭС
с реактором БН-800.....414
12.4.1. Общая характеристика трехконтурной АЭС
с реактором БН-800.....414
12.4.2. Характеристика второго контура схемы АЭС
с реактором БН-800.....416
12.4.3. Характеристика третьего контура схемы АЭС
с реактором БН-800.....419
12.4.4. Конструктивная схема парогенератора блока
с реактором БН-800.....421
Контрольные вопросы.....424
Заключение.....426
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....427
Оглавление.....429