

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

2.1 Паровой котел в технологической схеме производства пара

Паровым котлом называется устройство для выработки пара с давлением выше атмосферного за счет теплоты сжигаемого топлива. Сочетание топочной камеры в которой осуществляется горение топлива и теплоиспользующих поверхностей нагрева, в которых происходит нагрев воды до кипения, испарение воды (генерация пара) и перегрев пара называется котельным агрегатом. Котельная установка – это более широкое понятие, включающее дополнительные устройства для приготовления и ввода в топку топлива; вентиляторы для подачи воздуха; дымососы для отвода в атмосферу дымовых газов; питательные насосы и другое вспомогательное оборудование. Технологическая схема производства пара в паровом котле на электростанции, сжигающей угли в пылевидном состоянии, представлена на рис. 2.1.

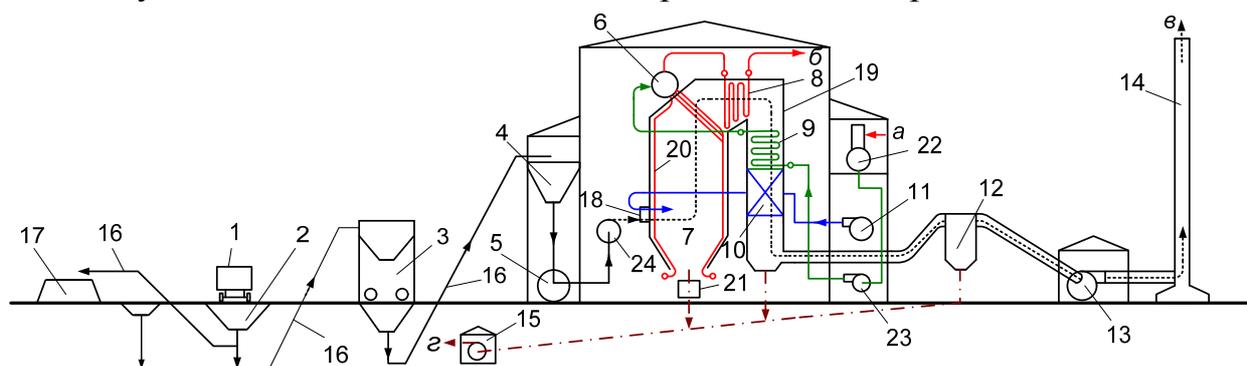


Рис. 2.1. Технологическая схема котельной установки, работающей на твердом органическом топливе: 1 – вагон с топливом; 2 – бункер разгрузочного устройства; 3 – дробилка; 4 – бункер сырого угля; 5 – мельничное устройство; 6 – барабан; 7 – топочная камера; 8 – пароперегреватель; 9 – водяной экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – дутьевой вентилятор; 12 – золоуловитель; 13 – дымосос; 14 – дымовая труба; 15 – багерный насос; 16 – ленточный транспортер; 17 – штабель угля; 18 – горелки; 19 – паровой котел; 20 – экраны; 21 – устройство шлакоудаления; 22 – деаэратор; 23 – питательный насос; 24 – мельничный вентилятор; а – питательная вода; б – перегретый пар; в – продукты сгорания; г – шлак и зола

Кусковое топливо выгружается из вагонов 1 в бункер разгрузочного устройства 2, откуда ленточным транспортером 16 подается в дробильное устройство 3, в котором топливо измельчается до кусков размером 15 мм. Затем уголь по ленточному транспортеру 16 подается в бункер сырого угля 4, откуда поступает в мельничное устройство 5. Здесь топливо окончательно измельчается и подсушивается. Готовая угольная пыль вместе с нагретым воздухом в воздухоподогреватели 10 через горелки 18 поступает в топочную камеру 7 парового котла 19, где и сгорает. При этом химическая энергия топлива преобразуется в тепло излучаемое от факела и топочных газов и передается поверхностям нагрева 20, экранирующим стены топочной камеры и в ко-

торых происходит нагрев и испарение воды, предварительно подогретой в экономайзере 9. Полученная из воды пароводяная смесь поступает в барабан котла 6, где осуществляется сепарация пара. После чего насыщенный пар подается в пароперегреватель 8, перегревается до определенных параметров и направляется в машинный зал к паровой турбине. Перегрев пара в пароперегревателе 8, нагрев питательной воды в экономайзере 9 и воздуха в воздухоподогревателе 10 осуществляется за счет охлаждения газообразных продуктов сгорания топлива. Подача воздуха в воздухоподогреватель производится дутьевым вентилятором 11. Зола, образующаяся в результате сгорания топлива, частично в виде шлака осаждается в топке и затем удаляется через холодную воронку системой шлакоудаления. Основная масса золы вместе с дымовыми газами проходит газоходы котла и улавливается в золоуловителе 12, остатки не уловленной летучей золы вместе с газообразными продуктами сгорания рассеиваются дымовой трубой 14 в окружающей атмосфере. Эвакуация продуктов сгорания из топочной камеры парового котла в дымовую трубу осуществляется с помощью дымососа 13. Образовавшиеся в результате горения твердого топлива в топке шлак и зола, уловленные в золоуловителе, транспортируются по каналам системы золошлакоудаления в багерную насосную установку 15, служащую для перекачки шлака и золы с технической водой по трубопроводам на золоотвалы.

Из рассмотрения технологической схемы производства пара следует, что в состав котельной установки входят (см. рис. 2.2):

- топливный тракт, т.е. путь движения топлива, включающий бункер сырого дробленного топлива 4, углеразмельняющую мельницу 5 и соединяющие это оборудование пылепроводы до горелочного устройства 18; сопротивление по топливному тракту, начиная с мельницы, преодолевается давлением, создаваемым дутьевым вентилятором 11;

- газовый тракт – путь движения продуктов сгорания, начинается в топочной камере 7, проходит через пароперегреватель 8, экономайзер 9, воздухоподогреватель 10, золоуловитель 12 и заканчивается дымовой трубой 14; аэродинамическое сопротивление газового тракта до дымовой трубы преодолевается дымососом 13;

- воздушный тракт – путь движения воздуха, включает короб холодного воздуха, воздухоподогреватель 10 и горелочные устройства 18; аэродинамическое сопротивление воздушного тракта преодолевается дутьевым вентилятором 11, который в целях вентиляции забирает воздух из верхней части помещения; в холодное время года, когда по температурным условиям усиленная вентиляция помещения недопустима, всасывающий воздухопровод переключают на забор атмосферного холодного воздуха;

- водопаровой тракт представляет собой путь последовательного движения питательной воды, пароводяной смеси и перегретого пара; водопаровой тракт включает следующие элементы оборудования: экономайзер 9, топочные экраны 20, барабан 6, пароперегреватель 8. Преодоление гидравличе-

ского сопротивления водопарового тракта различно в зависимости от метода генерации пара. Для рассмотренной схемы с котлом естественной циркуляции вода от экономайзера до барабана движется за счет давления, создаваемого питательным насосом; в топочных экранах движение пароводяной смеси осуществляется за счет естественной циркуляции; от барабана к турбине – за счет перепада давления. Для схемы с прямоточными котлами это сопротивление преодолевается питательным насосом.

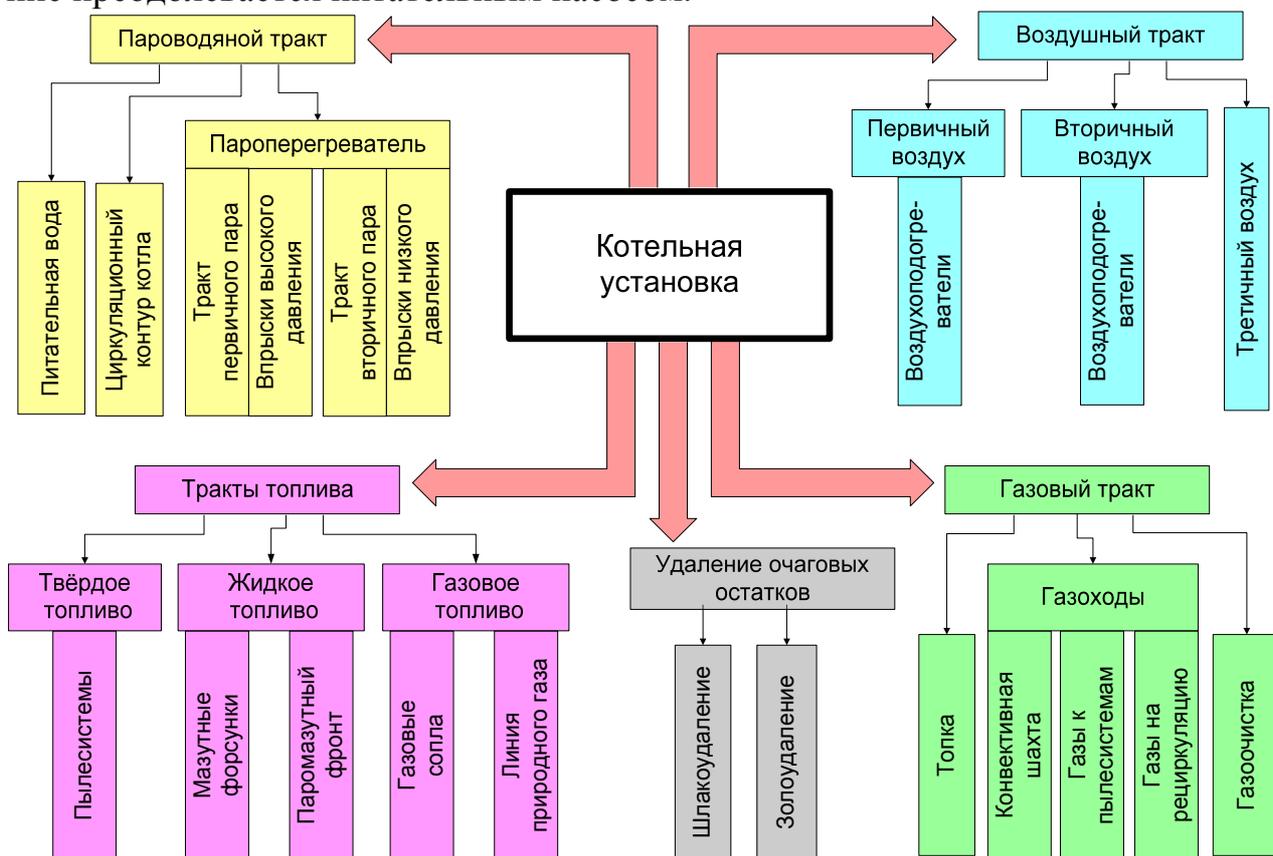


Рис. 2.2. Технологические тракты и функциональные узлы котельных установок

Работа оборудования котельной установки определяется протеканием большого комплекса сложных процессов. К их числу относятся:

1. Подготовка топлива для сжигания и подачи его в топочную камеру;
2. Преобразование химической энергии топлива в тепло;
3. Передача выделившегося тепла поверхностям нагрева: топочным экранам – излучением; пакетам труб – конвекцией;
4. Передача тепла от поверхностей нагрева рабочему телу: в экономайзере – воде, в испарительных трубах – пароводяной смеси, в пароперегревателе – перегреваемому пару, в воздухоподогревателе – воздуху;
5. Подача питательной воды в котел, фазовые превращения в процессе движения в его поверхностях нагрева и выдача перегретого пара заданных давления и температуры;
6. Организация водного режима, обеспечивающего предотвращение об-

разования отложений на интенсивно обогреваемых поверхностях нагрева и выдачу в турбину пара заданной чистоты;

7. Максимальное улавливание из продуктов сгорания золы и шлака и транспортировка их за пределы электростанции;

8. Транспортировка продуктов сгорания по газоходам и выброс их после охлаждения в котле через дымовую трубу в атмосферу;

9. Полностью механизированный и автоматизированный контроль и управление работой котельной установки и всех протекающих в нем процессов.

Организация перечисленных процессов, протекающих в элементах котельной установки, предъявлены определенные требования к конструкции ее оборудования. В свою очередь, рациональная конструкция оборудования создает условия нормального протекания процессов и обеспечивает надежную и экономичную работу котельной установки в целом.

2.2 Основные определения и термины паровых котлов

На рис. 2.3 представлена схема устройства парового котла с естественной циркуляцией, на примере которого рассматриваются принятые в котлостроении термины, определения, принципиальное назначение узлов агрегата.

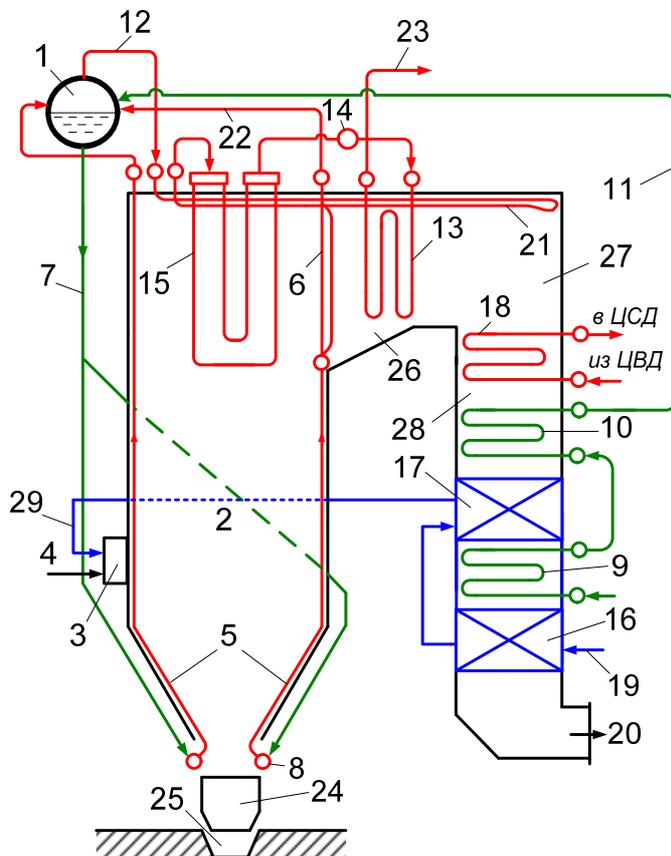


Рис. 2.3. Схема устройства парового котла с естественной циркуляцией: 1 – барабан; 2 – топочная камера; 3 – горелочное устройство; 4 – первичная пылевоздушная смесь; 5 – топочные экраны; 6 – фестон; 7 – опускные трубы; 8 – нижние коллекторы; 9 – первая ступень водяного экономайзера; 10 – вторая ступень водяного экономайзера; 11 – трубопровод; 12 – паропровод; 13 – конвективный пароперегреватель; 14 – пароохладитель; 15 – ширмовый пароперегреватель; 16 – первая ступень воздухоподогревателя; 17 – вторая ступень воздухоподогревателя; 18 – промежуточный пароперегреватель; 19 – подача холодного воздуха; 20 – уходящие газы; 21 – радиационный пароперегреватель; 22 – отводящие трубы; 23 – пар на турбину; 24 – шлаковый комод; 25 – канал гидрошлакоудаления; 26 – горизонтальный газоход; 27 – поворотная камера; 28 – конвективная шахта; 29 – горячий воздух

Паровой котел состоит из топочной камеры 2 и газоходов 26, 27, 28, поверхностей нагрева: экономайзера 9, 10, испарительных элементов (экранов) 5 и пароперегревателей 21, 15, 13, воздухоподогревателя 16, 17. Поверхности нагрева представляют собой металлические трубные поверхности, с одной стороны, омываемые горячими дымовыми газами, а с другой – водой, паровой смесью, паром, воздухом.

Питательная вода после группы подогревателей высокого давления тепловой схемы ТЭС (см. рис. В.2) поступает в экономайзер последовательно первой 9 и второй 10 ступени.

Экономайзер – трубчатая поверхность нагрева, служащая для подогрева горячими дымовыми газами питательной воды, подаваемой в котел питательным насосом. Подогретая питательная вода в экономайзере затем подается в барабан 1 котла, из которого котловая вода, перемешанная с питательной водой направляется по опускным трубам 7 в нижние коллектора 8 на питание испарительных поверхностей нагрева, в данном случае – топочных настенных трубчатых экранов 5. В экранных трубах происходит частичное испарение воды, сопровождающееся образованием паровой смеси за счет части тепла газообразных продуктов, образующихся при сжигании топлива в топочной камере 2. Топливо после его подготовки (сушки и размола) вместе с горячим воздухом подается в топочную камеру через горелки 3, где и сжигается факельным способом. Подогрев воздуха производится в воздухоподогревателе 16, 17. Часть воздуха, которая после воздухоподогревателя направляется на сушку и транспорт называется первичным, та часть воздуха которая подается на горелки в качестве окислителя для непосредственной организации процесса горения топлива называется вторичным.

Несмотря на то, что основной функцией водяного экономайзера и воздухоподогревателя, расположенных в конвективной шахте 28 является утилизация тепла (снижение температуры) уходящих газов для повышения коэффициента полезного действия котла, подогрев воздуха в воздухоподогревателе позволяет значительно интенсифицировать процессы горения и теплообмена, снизить недожог топлива и удельные затраты металла на поверхности нагрева.

Образующаяся пароводяная смесь из топочных экранов 5 по отводящим трубам 22 подается в барабан котла 1, где происходит сепарация (разделение) паровой смеси на воду и пар. После чего котловая вода замыкает цикл по опускным трубам 7 вновь направляется на испарение в экраны 5. Испарительные поверхности – экраны 5 и фестон 6 включает в барабан котла 1 и вместе с опускными трубами 7, соединяющими барабан с нижними коллекторами экранов 8, образуют циркуляционный контур, в котором осуществляется естественная циркуляция воды и паровой смеси за счет разности плотностей котловой воды в опускных трубах и паровой смеси в подъемных трубах экранов и фестона. Фестон 6 является испарительной поверхностью, образованной из разряженного вверху топки заднего экрана. Назначение

фестона заключается в организации свободного выхода из топки 2 топочных газов в горизонтальный газоход 26 и поворотную камеру 27.

Получающийся в барабане насыщенный пар проходит внутрибарабанные сепарационные устройства, оставляя здесь часть влаги с примесями, и направляется по паропроводу 12 на перегрев в пароперегреватель.

Пароперегреватель – трубчатая поверхность нагрева, служащая для подгрева пара выше температуры насыщения за счет теплоты, переданной конвекцией или комбинированно: радиацией (излучением) в топке и конвекцией в газоходах.

Пар в перегревателе проходит последовательно: потолочный (радиационный) перегреватель 21, ширмы 15 – плоские трубчатые полурadiационные поверхности и далее конвективный пароперегреватель 13. Между ширмовым и конвективным пароперегревателями расположен пароохладитель 14 для регулирования температуры острого пара, подаваемого после перегревателей котла к потребителю (на турбину) по главному паропроводу 23.

На котле, изображенном на рис. 2.3, имеется вторичный промежуточный пароперегреватель 18, служащий для повышения температуры пара, отработавшего в ряде ступеней турбины. Нагрев вторичного пара осуществляется высокотемпературными газообразными продуктами сгорания.

Со стороны дымовых газов котел имеет систему под разрежением или, как ее называют, систему с уравновешенной тягой, создаваемую совместным действием дымососной и дутьевых установок (см. рис. 2.1). Дутьевой вентилятор создает давление в воздухоподогревателе (1–3 кПа), воздуховодах 29 и горелках 3. Дымосос устанавливается, из соображения эрозии, после золоуловителей и создает разрежение, начиная с топки (20–40 Па вверху топочной камеры) и кончая самым дымососом (до 4 кПа).

В нижней части топки имеется система шлакоудаления, состоящая из холодной воронки, шлаковой шахты (комода) 24 и канала гидрошлакоудаления 25. Дутьевой вентилятор, дымосос, устройства для подготовки топлива перед сжиганием, золоулавливания, шлакозолоудаления и золоочистки являются вспомогательным оборудованием, обеспечивающим работу котла.

Котел с внешней стороны имеет наружное ограждение – обмуровку и включает в себя обшивку из стального листа 3–4 мм со стороны помещения котельного цеха, вспомогательный каркас, огнеупорную обмуровку, тепловою изоляцию толщиной 50–200 мм. Основные назначения обмуровки и обшивки заключается в уменьшении тепловых потерь в окружающую среду и обеспечении газовой плотности.

Каждый котел снабжается гарнитурой и арматурой. К гарнитуре относятся все приспособления и устройства – лючки, лазы, шиберы, обдувочные аппараты и т.п., к арматуре – все приборы и устройства, связанные с измерением параметров и регулированием рабочего тела (манометры, водоуказатели, задвижки, вентили, предохранительные и обратные клапаны и др.), обеспечивающие возможность и безопасность обслуживания агрегата.

Конструкции котла опираются на несущий стальной каркас, основными элементами которого являются стальные балки и колонны. Элементы мощных котлов подвешиваются к балкам, опирающимся на строительную конструкцию главного здания.

2.3. Классификация паровых котлов

Широкое распространение на практике получила классификация котлов: по назначению, по давлению, производительности, способу циркуляции воды (см. рис. 2.4).

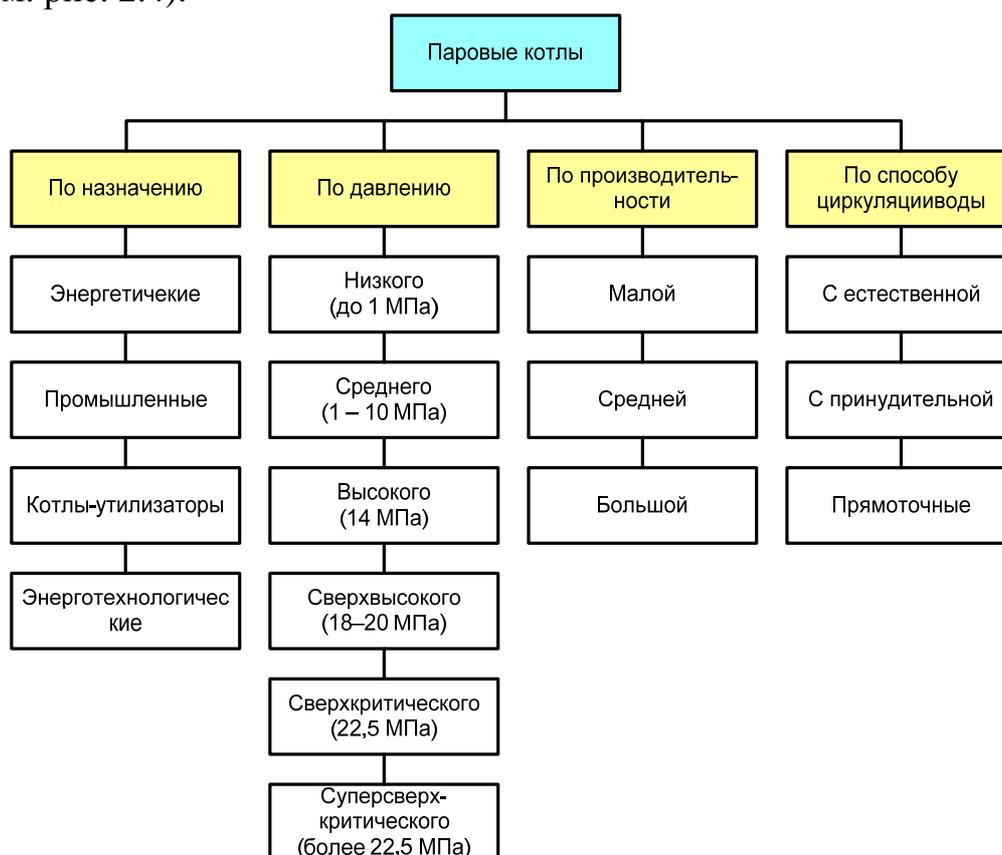


Рис. 2.4. Классификация паровых котлов

По назначению паровые котлы можно разбить на несколько групп: энергетические, промышленные, энерготехнологические и специальные.

Энергетические паровые котлы отличают: высокая единичная паропроизводительность, повышенные параметры пара, высокие требования к надежности и экономичности в процессе проектирования и изготовления на заводе, и, наконец, высокие требования к культуре эксплуатации на электростанциях.

Промышленные паровые котлы вырабатывают пар для технологических нужд промышленности и сельского хозяйства.

Отопительные котлы производят пар или горячую воду для отопления промышленных, жилых и общественных зданий.

Особое место занимают водогрейные отопительные котлы. Водогрейный котел – устройство для получения горячей воды с давлением выше атмосферного.

Котлы – утилизаторы и энерготехнологические котлы используют резервы вторичных энергетических ресурсов при переработке отходов химических производств, бытового мусора и др.

По давлению различают следующие группы котлов: котлы низкого (до 1 МПа), среднего (1–10 МПа), высокого (14 МПа), сверхвысокого (СВД) давления (18–20 МПа), сверхкритического давления (СКД) – давление 22,5 МПа, суперсверхкритического давления (ССКД) – давление выше 22,5 МПа.

По производительности различают котлы малой, средней, и большой производительности (энергетические).

По способу циркуляции воды все разнообразие конструкций паровых котлов малых и больших на весь диапазон рабочих давлений можно свести к трем типам: с естественной циркуляцией (рис. 2.5, а); с многократной принудительной циркуляцией (рис. 2.5, б) и прямоточные (рис. 2.5, в). В котлах с естественной циркуляцией движение рабочего тела по испарительному контуру осуществляется за счет естественного напора, обусловленного разностью плотностей столбов рабочей среды: воды ρ_v в опускных трубах и пароводяной смеси $\bar{\rho}_{см}$ в подъемных экранных (испарительных) трубах циркуляционного контура (рис. 2.5, а).

Циркуляционный контур образован замкнутой гидравлической системой состоящей из обогреваемых подъемных (ТЭ) и не обогреваемых опускных (ОП) труб, объединенных вверху барабаном (Б), а внизу – коллектором (К).

Движущий напор циркуляции $S_{дв}$, Па в контуре можно выразить формулой

$$S_{дв} = (\rho_v - \bar{\rho}_{см}) H_{п} g, \quad (2.1)$$

где $\rho_v = \rho'(t_s(p_6))$ – плотность котловой воды в опускных трубах кг/м³; $\bar{\rho}_{см}$ – средняя плотность пароводяной смеси в подъемных трубах, кг/м³; $H_{п}$ – высота паросодержащей части контура, м.

При относительно небольшой разности плотностей воды и пароводяной смеси необходимый движущий напор получают увеличением в высоту контура циркуляции.

При критическом давлении (22,5 МПа) рабочая среда является однофазной и ее плотность зависит только от температуры, а так как последние близки между собой в опускных и подъемных трубах, то движущий напор циркуляции будет очень мал. Поэтому на практике естественная циркуляция применяется для котлов только до сверхвысоких давлений (обычно не выше 18,5 МПа).

Возникающий в контуре циркуляции движущий напор обеспечивает движение рабочей среды в подъемных трубах с небольшой скоростью (1 м/с), при этом за один проход через подъемные трубы происходит частичное испарение воды (от 0,03 до 25 кг/кг), поэтому полное испарение исходного 1 кг воды про-

$$K_{ц} = \frac{G_{в}}{D_{пе}}. \quad (2.2)$$

В паровых котлах с естественной циркуляцией кратность циркуляции обычно составляет от 10 до 30. Таким образом, расход воды в контуре циркуляции в $K_{ц}$ раз больше паропроизводительности котла.

В экономайзере и пароперегревателе котла осуществляется однократное движение (прохождение) рабочего тела через поверхность нагрева. В экономайзере питательная вода движется за счет напора, развиваемого питательным насосом, в пароперегревателе перегретый пар движется за счет перепада давления между барабаном и турбиной.

Особенностью котлов с естественной циркуляцией является способ компоновки поверхностей нагрева, заключающийся в следующем: опускные трубы не должны обогреваться для сохранения на достаточно хорошем уровне $p_{в}$; подъемные трубы должны иметь такую трассировку, чтобы по ходу образующейся в них пароводяной смеси нивелирные уровни их все время повышались из-за опасности образования паровых пробок; скорости воды и смеси во всех трубах должны быть умеренными для получения невысоких гидравлических сопротивлений, что достигается выбором труб поверхностей нагрева достаточно большего диаметра (60–80 мм).

В котлах с многократной принудительной циркуляцией движение рабочего тела по испарительному контуру осуществляется в основном за счет работы циркуляционного насоса (НПЦ), включаемого в опускной поток рабочей жидкости (см. рис. 2.5, б). Кратность циркуляции поддерживается невысокой ($K_{ц} = 4–8$), поскольку циркуляционный насос гарантирует ее сохранение при всех колебаниях нагрузки. Котлы с многократной принудительной циркуляцией позволяют экономить металл на поверхность нагрева, особенно на СВД, так как допускают повышенные скорости воды и рабочей смеси и тем частично улучшают охлаждение стенки труб. Габариты агрегата при этом несколько снижаются, так как диаметры трубок можно выбирать меньшими, чем для котлов с естественной циркуляцией. Эти котлы могут применяться вплоть до критических давлений 22,5 МПа, наличие барабана дает возможность хорошо осушать пар и продувать загрязненную котловую воду. Все же следует констатировать, что этот тип котлов не нашел широкого распространения в отечественной энергетике, в основном из-за наличия циркуляционных насосов, хотя в зарубежной практике такие котлы широко используются наравне с прямоточными котлами.

Прямоточный котел характеризуется последовательным включением и однократным прохождением рабочей средой всех поверхностей нагрева (рис. 2.5, в). 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 паро-

проводу 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 на 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 прямоточных котлах 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. Отсутствие жидкой фазы – воды за испарительными поверхностями нагрева позволяет организовать работу котла не только на до критическом, но и сверхкритическом давлении, т.е. $p_{пв} > p_{кр}$.

Дорогой элемент – барабан у прямоточных котлов отсутствует, что дает при сверхвысоком давлении известное преимущество; зато это обстоятельство вызывает при сверхкритическом давлении удорожание стационарной водоподготовки, поскольку повышаются требования к чистоте питательной воды, которая должна в этом случае содержать примесей не больше, чем выдаваемый котлом пар. Прямоточные котлы универсальны по рабочему давлению, а на за критическом – вообще являются единственными генераторами пара на ТЭС–ТЭЦ и нашли большое распространение в современной энергетике.

2.4. Основные параметры и обозначения паровых котлов

К основным параметром паровых котлов государственный стандарт (ГОСТ) относит номинальную паропроизводительность, номинальное давление пара, номинальную температуру первичного и вторичного (промежуточного) перегрева пара, номинальную температуру питательной воды.

Номинальная производительность котла, D , кг/с, есть наибольшая паропроизводительность, которую должен обеспечить котел при длительной эксплуатации, при сжигании основного топлива, при соблюдении номинальных параметров пара и питательной воды, с учетом допускаемых отклонений.

Номинальное давление пара p , МПа (кгс/см²), т.е. принятое при проектировании котла абсолютное давление пара, которое должно обеспечиваться непосредственно за паросборной камерой пароперегревателя, а при отсутствии пароперегревателя – непосредственно перед паропроводом к потребителю пара при номинальной паропроизводительности котла.

Номинальные температуры пара $t_{пе}$, $t_{вт}$, °С, есть температуры пара, которые должны обеспечиваться котлом непосредственно за пароперегревателями при номинальных значениях основных параметров, с учетом допускаемых отклонений.

Номинальная температура питательной воды $t_{пв}$, °С – температура воды, принятая при проектировании котла и обеспечиваемая для его номинальной паропроизводительности перед входом в экономайзер.

Тепловое совершенство котла характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД брутто $\eta_{н}^{бр}$), который представляет собой отношение теплоты, переданной рабочему телу (воде–пару), к теплоте, полученной при сжигании топлива. Для современных мощных котлов тепловые потери небольшие и $\eta_{н}^{бр} = 93\text{--}94\%$. Параметры пара в отечественной энергетике регламентированы ГОСТ, что упорядочивает производство котлов и их эксплуатацию.

Классификация стационарных энергетических котлов по параметрам перегретого пара и допустимые отклонения от их номинальных значений приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Классификация стационарных энергетических котлов
по параметрам перегретого пара

Классификация по давлению пара и тип котла		Давление, МПа		Температура, °С		Допустимые отклонения от номинальных значений температуры, °С	
		На выходе из пароперегревателя	В барабане	Первичного пара	Промежуточного пара	Первичного пара	Пара промежуточного перегрева
Среднее	С естественной циркуляцией	4,0	4,4	440	–	+10 –15	–
Высокое		10,0	11,5	540	–	+5 –10	–
		14,0	15,5	570	–	+5 –10	–
		14,0	15,5	570	570	+5 –10	+5 –10
Сверхвысокое	Прямоточные	14,0	–	570	570	+5 –10	+5 –10
		255	–	565– 585	570	+5 –10	+5 –10

На стационарные паровые котлы в настоящее время действует ГОСТ на типы и основные параметры, который определяет типоразмеры, состояние или температуру пара, температуру питательной воды, вид топлива и топочного устройства.

Типоразмер парового котла включает: вид циркуляции воды, номинальную производительность и давление.

Обозначение паровых котлов с естественной циркуляцией имеет букву Е, прямоточных котлов – букву П, котлов с принудительной циркуляцией – буквы Пр. Если котел с промежуточным перегревом пара, то добавляется буква П. Затем следуют цифры, первая из которых обозначает паропроизводительность (т/ч), а вторая – давление, (кгс/см²). Так, для агрегата средней производительности можно, например, записать Е-75-40, что означает: «Стационарный паровой котел с естественной циркуляцией на 75 т/ч, абсолютным давлением 40 кгс/см² (4 МПа), с открытой камерной топкой и твердым шлакоудалением». Для других условий к упомянутым обозначениям добавляется индекс: Ж – топка с жидким шлакоудалением; Т – топка с твердым шлакоудалением; В – вихревая топка; Ц – циклонная топка; Р – решетка (слоевая топка); К – каменный уголь; Б – бурый уголь; Г – газ; М – мазут; Н – котел под наддувом (см. рис. 2.6).

Пример: для парового котла с естественной циркуляцией и открытой камерной топкой, паропроизводительностью 10 т/ч, абсолютным давлением 1,4 МПа, на газе и мазуте с наддувом обозначение по ГОСТ запишется: котел паровой – Е-10-14 ГМН.



Рис. 2.6. Маркировка паровых котлов

Параллельно с маркировкой ГОСТ существует заводская маркировка. Заводы изготовители применяют сокращенную маркировку: вначале ставятся первые буквы наименования завода: Т или ТКЗ – Таганрогский котлостроительный завод, П – Подольский машиностроительный завод, БКЗ – Барнаульский котельный завод, затем буква для характеристики топлива: П – пылеугольный; М – мазутный; Г – газовый; иногда дается по признаку циркуляции: П – прямоточный, Е – естественная циркуляция. При более ранней заводской маркировке давались еще цифры: производительность, порядковый номер серии, номер реконструкции и т. п.

Производство паровых котлов большой и средней мощности в России освоено на Таганрогском котлостроительном заводе (ТКЗ) – ПО «Красный котельщик», Подольском машиностроительном заводе им. С. Орджоникидзе (ЗиО), Барнаульском котельном заводе (БКЗ), входящем в ПО «Сибэнерго-маш», Белгородском заводе «Энергомаш» (БЗЭМ).

Котлы малой производительности изготавливают многие заводы, основными из которых являются Бийский котельный завод (БиКЗ), Монастырищенский машиностроительный завод (Черкасская обл.), Дорогобужском котельном заводе (ОАО «Дорогобужкотломаш» и ряд других промышленных предприятий.

Проектирование современных котельных агрегатов сосредоточено в инжиниринговом холдинге ОАО «ЭмАльянс» с филиалами в городах Таганрог, Барнаул, Подольск и Иваново.

2.5. Типы и конструктивные схемы паровых котлов

2.5.1. Котлы с естественной циркуляцией

Родоначальником паровых котлов с естественной циркуляцией является цилиндрический котел, у которого относительно небольшая поверхность нагрева образовалась из нижней наружной поверхности барабана, на $3/4$ заполненного водой и обогреваемого снаружи продуктами горения топлива. Котел имел ряд крупных недостатков, как, например, низкий удельный паросъем (1 кг пара с 1 м^2 поверхности нагрева), высокий удельный расход металла (1 кг металла на 1 кг пара), большие габариты, низкий КПД, исключительно большую силу взрыва, объясняемую относительно большим водяным объемом агрегата и др. Однако ряд присущих эксплуатационных достоинств, таких как невзыскательность к качеству питательной воды, большая тепловая аккумулирующая способность, простота устройства, обслуживания, способствовал тому, что котел длительное время был основным производителем пара. Дальнейшее развитие котлов с естественной циркуляцией представлено (частично) на рис. 2.7.

При дальнейшей модификации цилиндрического котла в прежних габаритах была увеличена поверхность нагрева цилиндрического котла при одновременном сохранении и даже уменьшении водяного объема и металлозатрат. Относительный рост поверхностей нагрева осуществлялся двумя методами. В первом случае в водяном объеме барабана размещалось большое количество труб, омываемых изнутри дымовыми газами, т. е. развивались внутренние поверхности нагрева (рис. 2.7, *а*). Такие котлы получили название газотрубных.

Второй метод увеличения поверхности нагрева заключался в размещении большого количества заполненных водой труб небольшого диаметра в газоходах, через которые проходили продукты сгорания (дымовые газы). В этом случае развивались внешние поверхности нагрева (рис. 2.7, *б–е*), и котлы получили название водотрубные.

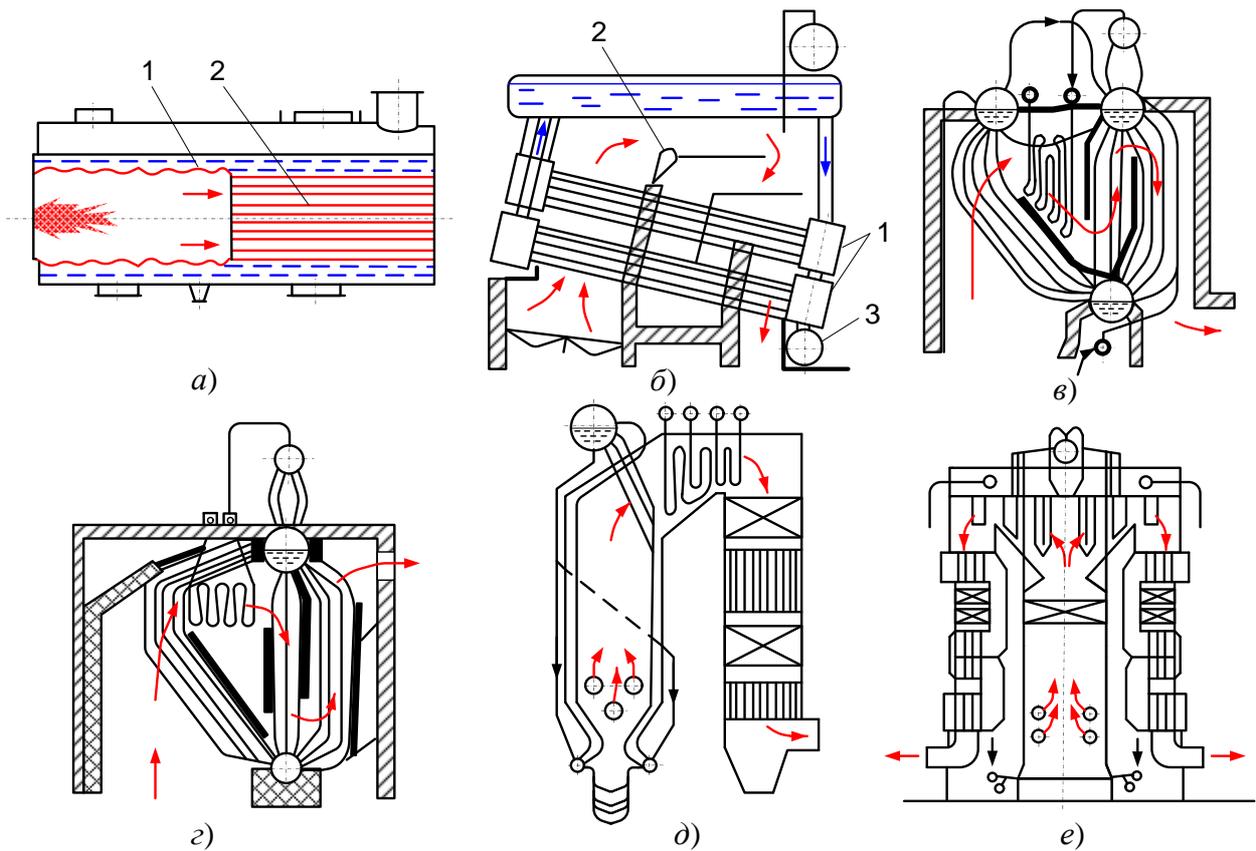


Рис. 2.7. Развитие конструкции котлов с естественной циркуляцией: *a* – жаротрубный (1) и дымогарный (2) котел; *б* – водотрубный котел В.Г. Шухова; 1 – водотрубные секции; 2 – поворотный шибер по газовой стороне; 3 – грязевик; *в* – водотрубный четырехбарабанный котел; *г* – водотрубный трехбарабанный котел; *д* – вертикальный водотрубный однобарабанный котел П-образной компоновки; *е* – вертикальный водотрубный однобарабанный котел Т-образной компоновки

Газотрубные котлы в свою очередь делились на жаротрубные с одной (позиция 1 на рис. 2.7, *a*), двумя и даже тремя жаровыми трубами большого диаметра (500–800 мм) и дымогарные, когда в водяном объеме цилиндрического котла размещался целый пучок труб малого диаметра 2, на рис. 2.7, *a*. Котлы дымогарные нашли в свое время широкое распространение на паровых локомотивах, паровозах и судовых установках.

Так как в водяном объеме котла невозможно расположить большое число жаровых и дымогарных труб, то максимальная единичная мощность таких агрегатов была крайне ограниченной, что в основном и вызвало прекращение их производства. Зато котлы водотрубные, особенно с гнутыми трубками, имели практически неограниченные возможности роста единичной мощности и поэтому нашли широкое распространение.

Серия водотрубных котлов (рис. 2.7, *б–г*) характеризуется постепенным переходом от многобарабанной к однобарабанной конструкции, переходом от многопучковой к однопучковой и даже к чисто экранной беспучковой конструкции современных вертикально-водотрубных котлов высокого давления (рис. 2.7, *д, е*). Преимущества вертикально-водотрубных котлов: максимальное ис-

пользование площади котельной; хорошая организация внутрикотловых процессов; высокая удельная паропроизводительность; надежная и безопасная работа. Последующее развитие вертикально-водотрубных котлов шло по пути:

- сокращения числа барабанов, что снизило стоимость и металлоемкость;
- увеличение доли радиационного теплообмена (подогрев воздуха и развитие радиационных поверхностей нагрева);
- интенсификация теплоотдачи конвекцией; применение высокого подогрева воздуха; повышение мощности и экономичности; снижение веса и стоимости.

В техническом развитии водотрубных котлов особое место занимает горизонтально-водотрубный котел Шухова (рис. 2.7, б). В. Г. Шухов впервые воплотил в котле заводскую стандартизацию секций 1, газовое регулирование перегрева пара 2, продувку через особые грязевики 3 и многое другое.

Идея упрощения и удешевления парового котла привела, как известно, к появлению прямоточного агрегата, у которого исчез последний барабан, и остались только теплообменные трубы и небольшие стальные коллекторы.

Решающее влияние на конструкцию котлов оказал термодинамический характер зависимости между давлением и энтальпией воды и пара. Известно, что с ростом давления и перегрева пара растет экономичность установок, а так как особенно большая экономия топлива достигается при больших выработках энергии, то технический прогресс в котлостроении сопровождался ростом параметров пара и единичной мощности агрегатов. С ростом рабочего давления возрастают энтальпия жидкости и перегретого пара, а теплота парообразования, наоборот, падает, поэтому с увеличением параметров пара растут экономайзерная и перегревательная поверхности нагрева, испарительная же уменьшается.

2.5.2. Котлы с многократной принудительной циркуляцией

На рис. 2.8 представлена конструктивная схема котла с многократной принудительной циркуляцией производительностью 830 кг/с (3000 т/ч) на докритическое давление. Циркуляционный насос 4 работает с перепадом давлений 0,3 МПа и позволяет применять трубы малого диаметра, что дает экономию металла. Малый диаметр труб и невысокая кратность циркуляции (4–8) вызывают относительное снижение водяного объема агрегата, следовательно, снижение габаритов барабана, уменьшение сверлений в нем, а отсюда общее снижение стоимости котла. Малый водяной объем и независимость полезного напора циркуляции от нагрузки позволяют быстро растапливать и останавливать агрегат, т. е. работать в регулировочно-пусковом режиме. Область применения котлов с многократной принудительной циркуляцией ограничивается сравнительно невысокими давлениями, при которых можно получить наибольший экономический эффект за счет удешевления развитых конвективных испарительных поверхностей нагрева. Котлы с многократной принудительной циркуляцией нашли распространение в теплоутилизационных и парогазовых установках, в парогенераторах АЭС.

2.5.3. Прямоточные котлы

Прямоточные котлы не имеют зафиксированной границы раздела фаз между экономайзером и испарительной частью, между испарительной поверхностью нагрева и пароперегревателем. При изменении температуры питательной воды, рабочего давления в агрегате, воздушного режима топки, влажности топлива и других факторов соотношения между поверхностями нагрева экономайзера, испарительной части и перегревателя меняются. Так, при понижении давления в котле снижается энтальпия жидкости, повышается энтальпия испарения и снижается энтальпия перегрева, поэтому уменьшается зона, занимаемая экономайзером (зона подогрева), растет зона испарения и уменьшается зона перегрева.

В прямоточных агрегатах все примеси, поступающие с питательной водой, не могут удаляться с продувкой подобно барабанным котлам и откладываются на стенках поверхностей нагрева или уносятся с паром в турбину. В принципе и в прямоточных котлах возможно удаление солей продувкой, путем установки водяной емкости (сепаратора) в конце испарительного участка. Однако на практике это оказывается затруднительным из-за упомянутого перемещения границы испарительной части, а также из-за тепловой разверки в параллельно включенных трубах испарителя и требует существенного усложнения системы регулирования. Поэтому прямоточные котлы, даже оборудованные специальной

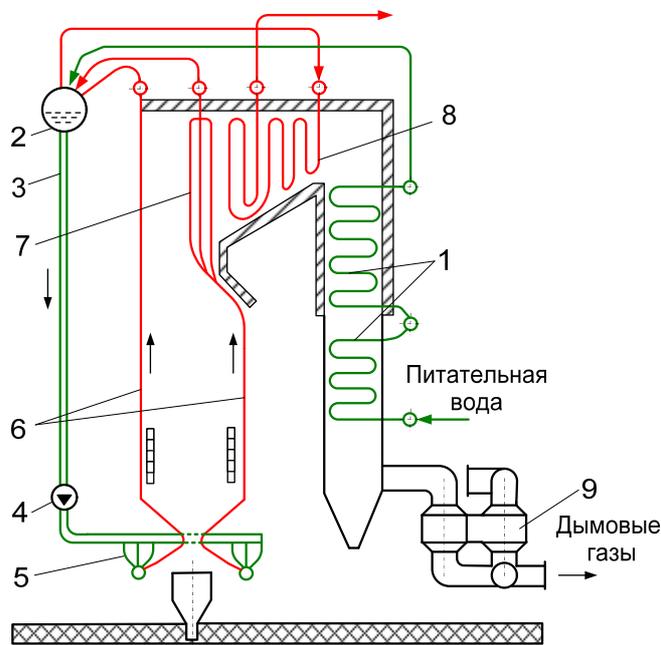


Рис. 2.8. Конструктивная схема котла с многократной принудительной циркуляцией: 1 – экономайзер; 2 – барабан; 3 – опускная питательная труба; 4 – циркуляционный насос; 5 – раздача воды по циркуляционным контурам; 6 – испарительные радиационные поверхности нагрева; 7 – фестон; 8 – пароперегреватель; 9 – регенеративный воздушный подогреватель

продувкой, предъявляют высокие требования к качеству питательной воды. Для уменьшения опасности пережога труб из-за отложения солей в них зону, в которой испаряются последние капли влаги и начинается перегрев пара, на докритических давлениях выносят из топки в конвективный газоход (так называемая вынесенная переходная зона).

В переходной зоне идет энергичное выпадение и отложение примесей, а так как температуры стенки металла труб в переходной зоне ниже, чем в топке, то опасность пережога труб значительно снижается и толщину отложений можно

допускать большей. Соответственно удлиняется межпромывочная рабочая кампания котла. Для агрегатов закритических давлений переходная зона, т. е. зона усиленного выпадения солей, также имеется, но она сильно растянута. Так, если для высоких давлений ее энтальпия измеряется величиной 200–250 кДж/кг, то для закритических давлений возрастает до 800 кДж/кг, и тогда выполнение вынесенной переходной зоны становится нецелесообразным, тем более, что содержание солей в питательной воде здесь так мало, что практически равно их растворимости в паре. Поэтому, если у котла на закритическое давление когда-либо выполняют вынесенную переходную зону, то делается это только из соображений обычного охлаждения дымовых газов.

Из-за малого аккумулирующего объема воды у прямоточных котлов важную роль играет синхронность подачи воды, топлива и воздуха. При нарушении этого соответствия в турбину можно подать влажный или чрезмерно перегретый пар, в связи с чем для прямоточных агрегатов автоматизация регулирования всех процессов является просто обязательной. Идея прямоточного котлостроения впервые высказана в 1785 г., но промышленное осуществление, решение совершенно самостоятельное и независимое от патента, выполнено русским инженером Д.И. Артемьевым (1893 г.) в его конструкции судового прямоточного котла, в котором воплощены: прямоточное движение среды, полное экранирование тонкими трубами, выносной сепаратор.

Прямоточный котел системы Бенсона (в дальнейшем – Бенсона–Сименса) вначале работал на критическом давлении (22 МПа), но так как использовать пар такого давления в то время было негде, то приходилось его дросселировать до 18 МПа, т. е. допускать перерасход электроэнергии на привод питательных насосов. В дальнейшем котлы Бенсона строились на давления ниже критического. На рис. 2.9, а показана конструктивная схема котла Бенсона на среднюю производительность и средние параметры пара. На каждой стене топки размещено по три вертикальных подъемных панели из труб с внутренним диаметром 25 мм. Направление движения рабочего тела – снизу вверх в экранах. Это способствует более устойчивой работе котла. Из верхних коллекторов одних панелей в нижние коллекторы других пароводяная смесь передается по наружным опускным трубопроводам. Наружные трубопроводы, иногда со смесительными коллекторами, удорожают агрегат Бенсона и являются негативной стороной конструкции.

Второй зарубежной распространенной конструкцией является прямоточный котел системы Зульцера. Для малой производительности (до 28 кг/с) эти агрегаты выполнялись одновитковыми, что полностью исключает неравномерное распределение рабочего тела по системе параллельных трубок. Однако при этом длина витка и его гидравлическое сопротивление чрезмерно возрастают. Котлы Зульцера на среднюю производительность (рис. 2.9, б) строятся многовитковыми. Расположение трубок в топке смешанное: горизонтальное и вертикальное. Горизонтальная компоновка применена для однофазной среды: для экономайзера внизу топки и перегревателя – вверху.

Трубы с двухфазной (вода – пар) жидкостью расположены вертикально в средней части топочной камеры в виде петель, так что подъемные и опускные трубы в отличие от системы Бенсона расположены в топке. Первые агрегаты Зульцера снабжались сепараторами пара, устанавливаемыми перед переходной зоной. Это обычный барабан с уровнем воды и всеми видами продувок (см. гл. 18). Паровые котлы Зульцера на высокие производительности и давления в 50-е годы нашли распространение в США.

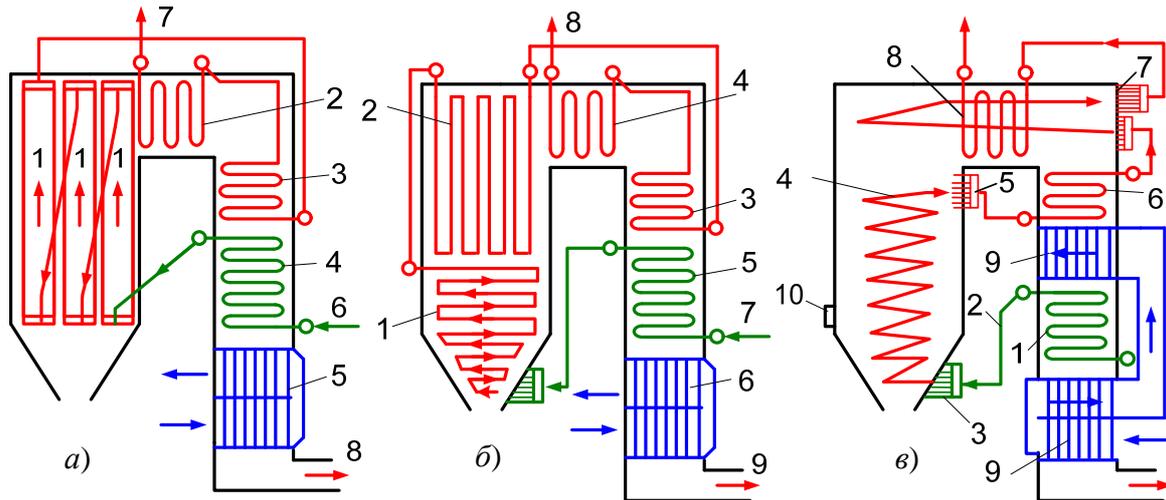


Рис. 2.9. Конструктивные схемы прямоточных котлов: *а* – котел Бенсона: 1 – экранные панели; 2 – пароперегреватель; 3 – вынесенная переходная зона испарения; 4 – экономайзер; 5 – воздухоподогреватель; 6 – подача питательной воды; 7 – вывод перегретого пара; 8 – вывод продуктов сгорания; *б* – Зульцера: 1 – горизонтальные панели экранов; 2 – вертикальные панели экранов; 3 – вынесенная переходная зона испарения; 4 – пароперегреватель; 5 – экономайзер; 6 – воздухоподогреватель; 7 – подвод питательной воды; 8 – вывод перегретого пара; 9 – вывод продуктов сгорания; *в* – котел Рамзина: 1 – экономайзер; 2 – перепускные необогреваемые трубы; 3 – нижний распределительный коллектор воды; 4 – экранные трубы; 5 – верхний сборный коллектор смеси; 6 – вынесенная переходная зона; 7 – настенная часть пароперегревателя; 8 – конвективная часть пароперегревателя; 9 – воздухоподогреватель; 10 – горелка

Прямоточные котлы конструкции профессора Л.К. Рамзина явились крупным достижением отечественного энергомашиностроения. Первый промышленный котел Рамзина, построенный на 56 кг/с, 14 МПа, 500 °С и установленный в 1933–1934 гг. на одной московской ТЭЦ, успешно проработал 40 лет. Особенностью котла является компоновка радиационных поверхностей нагрева в виде горизонтально-подъемной навивки трубок по стенам топки с минимумом коллекторов (рис. 2.9, *в*). Как показала в дальнейшем практика, такое экранирование имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Позитивным является равномерный обогрев отдельных трубок, включенных в ленту, так как трубки проходят по высоте топки все температурные зоны в одинаковых условиях. Негативным – невозможность выполнения радиационных поверхностей заводскими крупными блоками, а также повышенная склонность к теплогидравлическим разверкам при СВД и СКД из-за большого приращения энтальпии в длинном змеевике.

В настоящее время при сооружении мощных энергоблоков на высокие и критические давления особенности трех систем прямоточных котлов в значительной степени сгладились и стало повсеместным комбинированное блочное исполнение как горизонтальной навивки, так и вертикальных панелей.

Для всех систем прямоточных агрегатов соблюдаются некоторые общие требования. Так, в конвективном экономайзере питательная вода до поступления в топочные экраны не догревается до кипения примерно на 30°C , что устраняет образование пароводяной смеси и неравномерное ее распределение по параллельным трубкам экранов. Далее, в зоне активного горения топлива в экранах обеспечивается достаточно высокая массовая скорость $\rho\omega \geq 1500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при $D_{\text{ц}}$, что гарантирует надежное охлаждение трубок экранов. Испарение воды в топке доводится обычно в месте вывода смеси в переходную зону до 70–80%, в которой испаряется оставшаяся влага и весь пар перегревается на 10–15 $^{\circ}\text{C}$ во избежание отложения солей в верхней радиационной части перегревателя.

2.6. Примеры и контрольные вопросы

2.6.1. Пример

1. Определить расход воды в контуре циркуляции котельного агрегата Е-210-13,8-560 КБТ, если кратность циркуляции $K_{\text{ц}} = 10,2$.

Решение: переводим значение паропроизводительности в систему СИ:

$$D_{\text{пе}} = 210 / 3,6 = 58,33 \text{ кг/с.}$$

Расход воды в контуре циркуляции определяем по формуле:

$$G_{\text{в}} = K_{\text{ц}} \cdot D_{\text{пе}} = 10,2 \cdot 58,33 = 595,0 \text{ кг/с.}$$

2.6.2. Контрольные вопросы

1. Опишите технологическую схему современной котельной установки, работающей на твердом органическом топливе?
2. Перечислите основные тракты, входящие в состав котельной установки?
3. Назовите процессы, протекающие в таких поверхностях нагрева котельного агрегата как: топочные экраны, пароперегреватель, экономайзер?
4. Какие схемы водопаровых трактов котла вы знаете?
5. В чем преимущества и недостатки прямоточных и барабанных паровых котлов?
6. Что такое кратность циркуляции. Чему равна кратность циркуляции в прямоточном паровом котле?
7. Какие параметры котельного агрегата характеризуют его работу?
8. Укажите основные тенденции изменения конструкции котельных агрегатов с естественной циркуляцией?