

## **Раздел 10. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АГРЕГАТЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК (6 часов). Разделы РПД 10.1-10.3.**

### **10.1. Особенности энерготехнологического теплоиспользования**

Рассмотренные котлы-утилизаторы, использующие теплоту отходящих газов производственных технологических установок, теплоту технологической продукции или теплоту шлаков, обеспечивают повышение суммарного КПД теплоиспользования на предприятии и экономию топлива, не оказывая, однако, существенного влияния на протекание собственно технологического процесса. Отключение котлов-утилизаторов практически не сказывается на работе технологической установки.

В последние годы наряду с усовершенствованием существующих промышленных теплотехнологических установок, характеризующихся низким тепловым КПД и рядом неустраняемых недостатков, разрабатываются [1] новые энерготехнологические агрегаты (ЭТА) с высокой технологической и энергетической эффективностью. Энерготехнологическое теплоиспользование предполагает не простое сочетание существующей промышленной технологической установки с дополнительным теплоиспользующим устройством, как это имеет место при использовании тепловых отходов (вторичных энергоресурсов) в обычном их понимании. В энерготехнологическом агрегате модернизируется и оптимизируется вся система теплоиспользования, начиная с рабочей камеры. Раздельная работа технологических и энергетических элементов в ЭТА невозможна. При их совместной работе в первую очередь обеспечивается повышение эффективности технологического процесса, достигается увеличение длительности рабочей кампании и повышение энергетической эффективности агрегата в целом.

Одним из перспективных направлений интенсификации теплотехнологической переработки наиболее широко применяемых в промышленности различных мелкозернистых материалов является

циклонный принцип организации технологических процессов, например в топочных устройствах. Для ряда процессов высокая технологическая эффективность может быть достигнута при использовании принципа кипящего слоя.

Выбор оптимального варианта использования теплоты отходящих газов, а также использования других теплоносителей определяется в общем случае технико-экономическими расчетами, учитывающими характер технологического процесса, мощность установки и конкретные условия на предприятии. Во многих случаях высокая технологическая, энергетическая и эксплуатационная эффективность достигается при комбинированной выработке основной технологической и дополнительной энергетической продукции (пара).

Для плавильных процессов надежная работа теплоиспользующих устройств, располагаемых за плавильной камерой, требует охлаждения отходящих газов и содержащегося в них уноса до температуры, обеспечивающей полную грануляцию полидисперсного уноса. В связи с этим непосредственно к технологической плавильной камере целесообразно присоединять камеру радиационного охлаждения с относительно холодными испарительными экранными поверхностями нагрева. Применение энергетического элемента - радиационного котла - решает задачу повышения надежности и эффективности технологического плавильного процесса, одновременно значительно улучшаются и энергетические показатели установки.

Для осуществления многих низкотемпературных технологических экзотермических процессов в кипящем слое необходим отвод избыточной теплоты из слоя во избежание плавления или размягчения «кипящих» частиц. Установка в слое энергетических теплоиспользующих элементов (экономайзера, испарительных или пароперегревательных поверхностей нагрева) обеспечивает надежную работу слоя, одновременно улучшая энергетические показатели процесса.

С увеличением мощности технологической установки увеличивается целесообразность создания комбинированных ЭТА, вырабатывающих одновременно технологический и энергетический продукты.

## 10.2. Энерготехнологические агрегаты

На рисунке 10.1 показана схема энерготехнологического агрегата, разработанная применительно к плавильным циклонным процессам [2].

Агрегат состоит из циклонной плавильной камеры с охлаждаемой гарнисажной футеровкой, где осуществляется (полностью или частично) тот или иной технологический процесс, камеры радиационного охлаждения газов и уноса и других теплоиспользующих элементов. В конкретных условиях отдельные элементы ЭТА могут отсутствовать или иметь соответствующие конструктивную форму и компоновку, например, циклонная камера может быть с нижним (как показано на схеме) и с верхним выводом газов. Могут иметься устройства для дополнительной обработки выходящего из циклона расплава и пр.

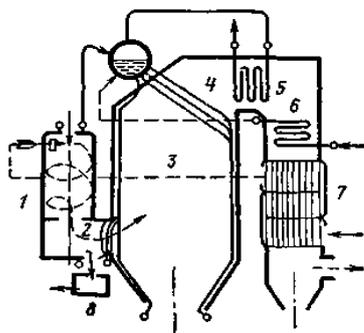


Рисунок 10.1 - Схема энерготехнологического агрегата: 1 - циклонная камера; 2 – сепаратор расплава; 3 – камера радиационного охлаждения газов; 4 – фестон; 5 – пароперегреватель; 6 – экономайзер; 7 – воздухоподогреватель; 8 – устройство для дополнительной обработки расплава

Для комбинированного ЭТА полезное тепловосприятие  $Q_{\text{пол}}$  складывается из теплот, требуемых на выработку технологической продукции  $Q_{\text{т}}$  и энергетической продукции  $Q_{\text{э}}$ :

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{э}},$$

а тепловой КПД энергетического агрегата равен:

$$\eta_{ЭТА} = \eta_{\text{п}} + \Delta\eta_{\text{э}} = (Q_{\text{т}} + Q_{\text{э}})100/(Q_{\text{хт}} + Q_{\text{экз}}),$$

где  $\eta_{\text{г}}$  - тепловой КПД технологического процесса;

$\Delta\eta_{\text{э}}$  - увеличение КПД за счет выработки энергетической продукции.

При выполнении установки по комбинированной энерготехнологической схеме полезное тепловосприятие на выработку технологической и энергетической продукции возрастает с 15-30 до 85-90 %.

### **10.3. Котлы производственных технологических систем. Условия и эффективность применения котлов-утилизаторов**

На промышленных предприятиях в целях энергосбережения максимально применяют вторичные энергоресурсы [3], и широкое распространение находят различные котлы, использующие для выработки пара теплоту отходящих газов производственных технологических установок, а также теплоту технологического продукта, теплоту шлака, теплоту охлаждающей воды и др. Конструкция таких котлов в значительной степени определяется особенностями используемого теплоносителя. Так, при температуре отходящих газов более 1000-1100 °С для восприятия их теплоты применяют радиационные поверхности нагрева, способствующие также бесконтактной грануляции расплавленного выноса, который может содержаться в таких отходящих газах. При температуре газов ниже 800-900°С применяют конвективные поверхности нагрева.

При выборе конструкции и условий работы котла, использующего тепловые отходы, приходится учитывать их агрессивный характер. Так, отходящие газы печей для обжига серосодержащего сырья содержат оксиды серы. При определенных условиях и наличии в газах паров воды (при температуре ниже температуры точки росы) может образоваться серная кислота, что приводит к электрохимической коррозии поверхностей нагрева. При температуре стенки более 500-600 °С оксиды серы способствуют высокотемпературной газовой коррозии.

Отходящие из промышленных печей газы могут содержать значительное

количество уноса, который вызывает эрозию поверхностей нагрева. При высокой температуре газа унос может находиться в расплавленном или размягченном состоянии, что может привести к заносу поверхностей нагрева котла и в связи с этим к уменьшению тепловосприятости и увеличению газовых сопротивлений. При этом используют [4] различные методы наружной очистки котлов-утилизаторов.

При использовании для выработки пара (горячей воды) физической теплоты технологической продукции, физической теплоты шлака или теплоты охлаждающей воды необходимо при выборе теплопередающих поверхностей нагрева котла также учитывать особенности этих теплоносителей.

При получении пара или горячей воды за счет теплоты отходящих газов в теплоиспользующей установке температура газов снижается от  $t_{ог}$  до  $t_{уг}$ . При этом дополнительная полезная теплота, МВт, составляет [5]:

$$Q_{доп}^{ог} = V(N'_{ог} - N_{уг} + \Delta\alpha N_э)\phi,$$

где  $V$  - расход топлива технологической установкой, кг/с (или  $m^3/c$ );

$N'_{ог}$  и  $N_{уг}$  - энтальпии отходящих и уходящих газов, МДж/кг (или МДж/ $m^3$ );

$\Delta\alpha N_э$  - теплота воздуха, присосанного в теплоиспользующей установке, МДж/кг (или МДж/ $m^3$ );

$\phi$  - коэффициент сохранения теплоты, учитывающий потери теплоты от наружного охлаждения.

При использовании для выработки пара или горячей воды физической теплоты технологического продукта  $G$ , кг/с, и физической теплоты шлаков  $G_{шл}$  дополнительные полезные теплоты, МВт, составляют:

$$Q_{доп}^{тп} = G(N'_{тп} - N''_{тп})\phi; \quad Q_{доп}^{фш} = G_{шл}(N'_{фш} - N''_{фш})\phi.$$

Здесь  $N'_{тп}$  и  $N'_{фш}$  - начальные энтальпии технологического продукта и шлака при температуре  $t'_{тп}$  и  $t'_{ш}$ , МДж/кг;

$N''_{тп}$  и  $N''_{фш}$  - конечные энтальпии технологического продукта и шлака при температуре  $t''_{тп}$  и  $t''_{ш}$ , МДж/кг.

При использовании указанных тепловых отходов (дополнительной

полезной теплоты  $Q_{\text{доп}}$ , МВт) выработка пара  $D$ , кг/с, или горячей воды  $G_{\text{в}}$  составляет (без учета продувки):

$$D = Q_{\text{доп}} / (h_{\text{пп}} - h'_{\text{пв}}); \quad G_{\text{в}} = Q_{\text{доп}} / (t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}).$$

Здесь  $h_{\text{пп}}$  и  $h'_{\text{пв}}$  - энтальпии перегретого пара, питательной воды на выходе и входе котла, МДж/кг;

$t''_{\text{в}}$ ,  $t'_{\text{в}}$  - температуры воды на выходе и входе котла, °С.

При использовании для выработки пара или горячей воды теплоты отходящих газов, физической теплоты технологического продукта или шлаков получается экономия топлива, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ ):

$$\Delta B = 100Q_{\text{доп}} / (Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}),$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  - теплота сгорания топлива, МДж/кг (или МДж/м<sup>3</sup>);  $\eta_{\text{к}}$  - КПД замещаемого котла, %.

Суммарный тепловой КПД технологической установки с дополнительным теплоиспользованием, %, составляет

$$\eta_{\text{у}} = \eta_{\text{техн}} + \Delta\eta_{\text{доп}} = 100(Q_{\text{техн}} + Q_{\text{доп}}) / BQ_{\text{н}}^{\text{р}},$$

где  $Q_{\text{техн}}$  - теплота, полезно затраченная на выработку технологической продукции, МВт.

#### **10.4. Котлы на отходящих производственных газах или котлы-утилизаторы**

Для утилизации теплоты отходящих газов промышленных технологических установок применяют два основных типа котлов: водотрубные радиационно-конвективные, использующие теплоту высокотемпературных отходящих газов, а также газотрубные и водотрубные конвективные для утилизации теплоты низкотемпературных газов [6-8].

Например, серия водотрубных конвективных котлов разработана для использования теплоты отходящих газов нагревательных, мартеновских и других печей. На рисунке 10.2 для примера показан котел типа КУ-125. Котел однобарабанный, имеет многократную принудительную циркуляцию, компоновка П-образная. По ходу газов последовательно расположены первая секция испарительной поверхности нагрева 1, пароперегреватель 2, вторая 3

и третья 4 секции испарительной поверхности нагрева и экономайзер 5. Для очистки поверхностей нагрева применяются водяная обмывка и паровая обдувка. Котел рассчитан на 125 000 м<sup>3</sup>/ч газов. Паропроизводительность установки зависит от начальной температуры греющих газов. При температуре газов на входе 850 °С паропроизводительность составляет 11,36 кг/с, давление перегретого пара 4,5 МПа, температура перегретого пара 385 °С. При температуре газов на входе в котел 650°С паропроизводительность составляет 7,6 кг/с, температура перегретого пара 365 °С.

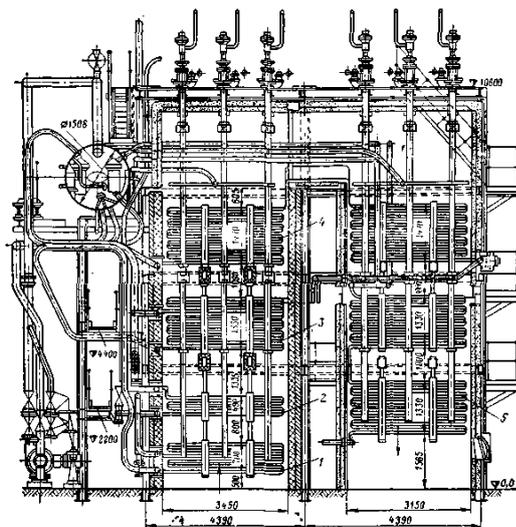


Рисунок 10.2 - Котел-утилизатор КУ-125

Котлы-охладители конвертерных газов типа ОКГ предназначены для установки за сталеплавильными конвертерами различной производительности [9-11]. Возможна работа котлов с дожиганием оксида углерода, содержащегося в отходящих газах, с частичным дожиганием и без дожигания. Котлы выполняются радиационного типа с многократной принудительной циркуляцией, П-образной компоновки. Поверхности нагрева, выполненные в виде газоплотных «мембранных» экранов, изготавливаются из труб диаметром 38x5 мм. Температура газов на входе в котел 1600 °С, температура уходящих газов 1100°С, паропроизводительность котла — до 44,5-100 кг/с, давление насыщенного пара 1,75 МПа или перегретого пара 3,9 МПа.

Выход конверторного газа, его состав и калорийность являются переменными величинами и определяются особенностями металлургического процесса. Имеются различные предложения [12-16] фирмы «Кавасаки стил» (Япония) по повышению эффективности использования конверторного газа путем регенерации его физического тепла на полуокислительную или восстановительную конверсию при вводе водяного пара, углеводородов и углерода. Например, конверсию конверторного газа производят [12] путем смешения его с водяным паром в количестве 0,07-0,5 кг/м<sup>3</sup> газа. При использовании мокрой газоочистки узел ввода пара располагают на выходе с охладителя до скрубберов (рисунок 10.3, а), а при наличии сухих металлорукавных фильтров – после газоочистки (рисунок 10.3, б). При этом реализуется реакция по уравнению:  $CO + CO_2 + H_2O = 2CO_2 + H_2 - Q$ .

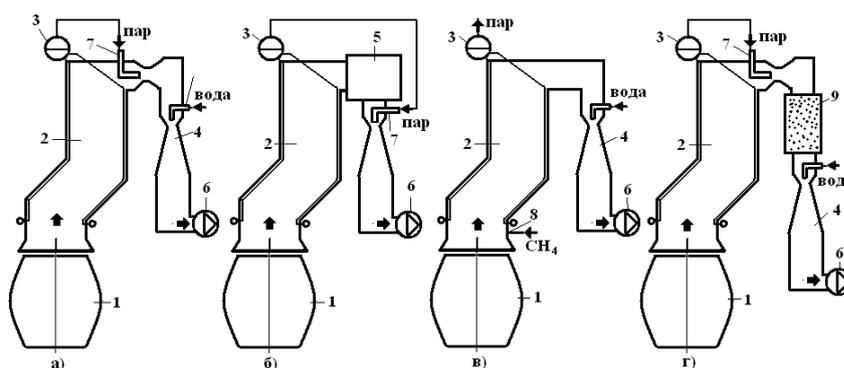


Рисунок 10.3 - Схемы преобразования конверторного газа: 1 – конвертор; 2 – ОКГ; 3 - барабан-сепаратор; 4 – скрубберная газоочистка; 5 – сухая газоочистка; 6 – эксгаустер; 7 - паровой эжектор; 8 – ввод природного газа; 9 – реактор с коксом

Для подачи пара и создания разрежения в газовом тракте может использоваться [13] паровой эжектор, установленный в газоходе после охладителя, на который подается пар с ОКГ. Для утилизации тепловой энергии отходящих конверторных газов до охладителя вдувают [14] газообразные углеводороды (рисунок 10.3, в), осуществляя химическое взаимодействие с конверторными газами за счет их тепла, а образующиеся продукты собирают в газгольдере. На примере вдувания природного газа при

температурах 1000-1600 °С реализуется реакция:  $2\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 = 4\text{CO} + 2\text{H}_2 - Q$ .

Термический потенциал конверторного газа используют [15] для нагрева кокса в циркуляционном реакторе с одновременной обработкой кокса струей водяного пара и генерацией водяного газа (рисунок 10.3, г). При этом, при температуре конверторного газа 600-800 °С для равновесных условий реализуется реакция:  $\text{CO} + \text{CO}_2 + 2\text{C} + \text{H}_2\text{O} = 4\text{CO} + \text{H}_2 - Q$ . Термодинамический анализ приведенных уравнений показывает, что максимальной эффективностью по отмывке конверторного газа от  $\text{CO}_2$  обладает процесс, описываемый уравнением:  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{C} + \text{H}_2\text{O} = 4\text{CO} + 6\text{H}_2 - Q$ . Для привода эксгаустера применяют [16] паровую турбину, использующую пар с аккумуляторов ОКГ. В период, когда продувка металла не производится, подача пара в турбину снижается для прогрева турбины.

На основе приведенного патентного обзора и термодинамического анализа на кафедре ТиЭС МГТУ предложена [17] схема преобразования и утилизации конверторного газа и пара с ОКГ, включающая использование физической и химически связанной теплоты конвертерного газа.

Для утилизации тепла коверторных газов используют охладители конверторного газа типа ОКГ с выработкой пара низких и средних давлений, применяемого, в основном, для собственных нужд и в теплоснабжении. Основной проблемой использования пара с ОКГ является периодичность его образования при продувке металла в конверторе, которая может быть сглажена при последовательной работе нескольких конверторов или при сборе пара в водо-паровых аккумуляторах, причем в последнем случае на выходе аккумулятора образуется насыщенный пар.

На кафедре ТиЭС МГТУ предложен ряд проектов [18-20] по разработке схем утилизации конвертерного газа и пара с ОГК на технологические нужды и выработку электроэнергии. В схемах ОКГ без дожигания после утилизации физического тепла конверторного газа он подвергается очистке и сбору, например в газгольдере [21] или в нескольких напорных трубопроводах, с

последующим использованием в качестве топлива в котлах [18] или автономном пароперегревателе, замещая более дорогостоящий природный газ. Насыщенный пар после парового аккумулятора перегревается в автономном пароперегревателе и эффективно используется в технологических целях, например в пароэжекторных насосах установок внепечного вакуумирования [19] или энергетических целях, для выработки электроэнергии в паровых турбинах [20]. Данные технические решения защищены патентами РФ на полезные модели [22-23] авторами кафедры с сотрудниками ПАО «ММК».

### **10.5. Котлы, использующие теплоту технологического продукта**

В ряде случаев готовый технологический продукт после промышленной установки содержит значительное количество теплоты, при использовании которой можно дополнительно получить энергетический или технологический пар. Так, на выходе из коксовой печи кокс имеет температуру 1100-1150 °С. Для использования его физической теплоты в установках сухого тушения кокса (УСТК) через горячий кокс, опускающийся в камеру-бункере, прокачивается нейтральный теплоноситель (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), который, охлаждая кокс, нагревается, далее проходит котел, где охлаждается, затем вновь поступает в камеру для сухого тушения (охлаждения) кокса и т.д.

Котел для использования теплоты газов после сухого тушения кокса типа КСТК-35/40-100 башенной компоновки показан на рисунке 10.4 и имеет подвод газов сверху.

Стены газохода котла выполнены газоплотными панелями из труб диаметром 57 мм с толщиной стенки 5 мм, включенных в контур естественной циркуляции. Расположенные внутри газохода конвективные поверхности (трубы диаметром 28 мм с толщиной стенки 3 мм) включены в контур циркуляции. По ходу газов последовательно расположены пароперегреватель 1, испарительная поверхность нагрева 2 и экономайзер 3.

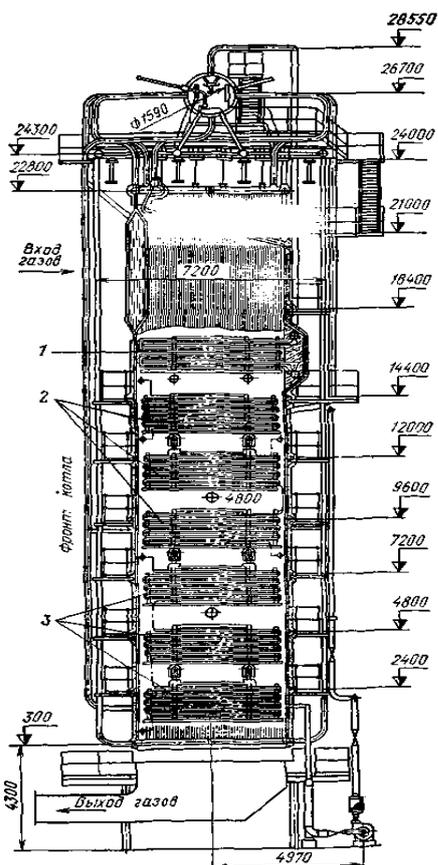


Рисунок 10.4 - Котел КСТК-35/40 для использования теплоты горячего кокса

Расчетный расход газов через установку -  $100000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Температура газов на входе в котел  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура уходящих газов  $150^\circ\text{C}$ , паропроизводительность установки  $9 \text{ кг/с}$ , давление перегретого пара  $4 \text{ МПа}$ , температура пара  $440 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 10.6. Получение пара в элементах технологических установок и его перегрев

В современных производственных технологических установках, работающих при высоких температурах, имеется ряд элементов, охлаждаемых кипящей водой с получением пара. Применение испарительного охлаждения вместо водяного, применявшегося ранее, позволило сократить расход воды примерно в 20 раз. При этом повысилась надежность работы элементов. Системы испарительного охлаждения (СИО) находят применение для мартеновских, доменных, методических и других печей [24-25].

В качестве примера укажем, что при охлаждении различных элементов

мартеновских печей (пятовых балок, рам завалочных окон, фурм и газовых кессонов) отводится 15-20 % располагаемой теплоты. Широкое распространение получила испарительная система охлаждения элементов с получением пара низких параметров (0,2-0,3 МПа). Однако такой пар находит лишь ограниченное применение на металлургических заводах. Значительно более целесообразна схема комплексного использования теплоты испарительного охлаждения и теплоты уходящих из мартеновской печи (или нагревательных печей) газов с получением пара повышенных параметров (рисунок 10.5).

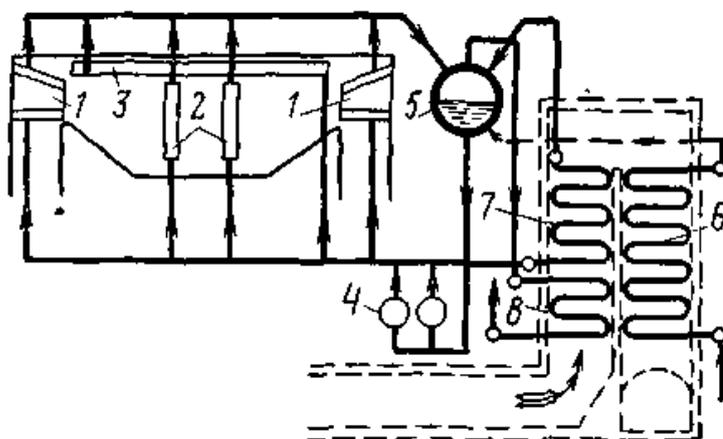


Рисунок 10.5 - Схема комплексного использования теплоты испарительного охлаждения и уходящих газов мартеновской печи: 1 – газовые кессоны; 2 - рамы завалочных окон; 3 – подпяточные балки; 4 – циркуляционные насосы; 5 – барабан; 6 – экономайзер; 7 – испарительные поверхности; 8 – пароперегреватель.

Образующийся в испарительных элементах пар направляется в барабан, куда также поступает пар, полученный в котле-утилизаторе, использующем теплоту отходящих газов. При комплексной схеме элементы испарительного охлаждения выполняют с трубчатой системой для возможности повышения давления получаемого пара. Котел на отходящих газах выполняется обычно по схеме с многократной принудительной циркуляцией.

В последнее время испарительное охлаждение высокотеплонагруженных элементов с получением пара, в том числе и

энергетических параметров, применяется для высокопроизводительных плавильных процессов, организуемых, например, в циклонных камерах.

При наличии на промышленных предприятиях устройств, вырабатывающих насыщенный пар, в случае необходимости его перегрева, а также для увеличения температуры перегретого пара применяют **автономные пароперегреватели**. В этом случае для экономичной работы пароперегревателя используется дополнительное топливо, например доменный, коксовый или конвертерный газ.

При этом расход топлива  $B$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , на перегрев  $D$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ , пара в автономном пароперегревателе составляет:

$$B = 100D(h''_n - h'_n)/Q^c_n \cdot \eta_{ап},$$

где  $h'_n$  и  $h''_n$  - энтальпии пара до автономного пароперегревателя и после него,  $\text{МДж}/\text{кг}$ ;

$Q^c_n$  - теплота сгорания топлива,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ ;

$\eta_{ап}$  - КПД автономного перегревателя, %.

На кафедре ТиЭС МГТУ совместно с Новотроицким филиалом МИСиС для условий ОАО «Уральская сталь» (г. Новотроицк) разработан проект [26] утилизации низкопотенциального пара, перегретого в автономном пароперегревателе, в части низкого давления паровой турбины.

### **10.7. Водогрейные и пароводогрейные котлы**

Назначением водогрейных котлов является [27-29] получение горячей воды заданных параметров, и их применяют для снабжения подогретой водой систем отопления и вентиляции, бытовых и технологических потребителей. Водогрейные стальные котлы, работающие обычно по прямоточному принципу с постоянным расходом воды, устанавливают в промышленно-отопительных котельных, а также на ТЭЦ для покрытия пиковых отопительно-вентиляционных нагрузок. Температура воды на входе в котел  $70^\circ\text{C}$  (в пиковом режиме до  $110^\circ\text{C}$ ), температура воды на выходе из котла –  $150^\circ\text{C}$  и более (до  $210^\circ\text{C}$  для систем теплоснабжения со сверхдальним транспортом тепла). В пароводогрейных котлах наряду с

получением подогретой воды вырабатывается также технологический пар. Для водогрейных котлов установлена следующая шкала тепловых мощностей, МВт (Гкал/ч): 4,65 (4); 7,5 (6,5); 11,63 (10); 23,3 (20); 35 (30); 58,2 (50); 116,3 (100) и 209,4 (180).

Водогрейные котлы мощностью до 23,3 МВт обычно обеспечивают работу только в основном режиме с подогревом воды до 150 °С. При этом давление воды на входе в котел принимается 1,6 МПа. Котлы мощностью 35 МВт и выше должны допускать работу в основном и пиковом режимах с возможностью подогрева воды до 200 °С. Давление воды на входе в котел 2,5 МПа. Котлы могут работать на газе, жидком или твердом топливе. В промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве имеется значительное количество водогрейных котлов, изготовленных различными заводами. Далее рассматриваются конструкции и особенности некоторых водогрейных котлов.

### 10.8. Конструкции водогрейных котлов

На рисунке 10.6 показан газомазутный водогрейный котел типа ПТВМ-30М (КВ-ГМ-30-150) с П-образной компоновкой поверхностей нагрева, положительно зарекомендовавший себя при эксплуатации. Расчетная тепловая мощность котла около 35 МВт. Топка котла экранирована трубами  $\varnothing 60 \times 3$  мм и оборудована шестью газомазутными горелками. Конвективная поверхность расположена в опускной шахте с экранированными стенками.

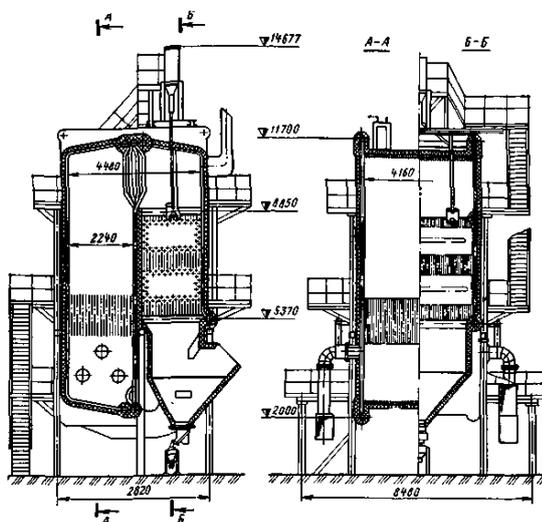


Рисунок 10.6 - Водогрейный газомазутный котел ПТВМ-30М (КВ-ГМ-30-

150)

Температура воды на входе в котел 70, на выходе — 150 °С. При работе котла на газе расход воды составляет около 500, а при работе на мазуте — 435 т/ч. При этом тепловая мощность котла соответственно составляет 46,4 и 40,7 МВт, температура уходящих газов—188 и 250 °С, а расчетный КПД котла — 92,2 и 89,5 %. Обмуровка котла выполнена облегченной, с креплением к трубам.

Циркуляционная схема котла ПТВМ-30М показана на рисунке 10.7. Вход воды осуществляется во фронтальной экран топочной камеры, а выход — из бокового экрана топки.

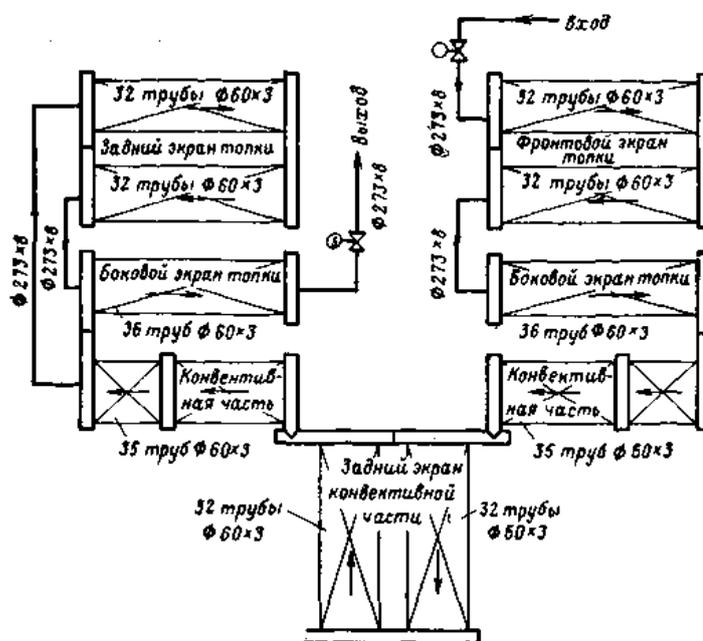


Рисунок 10.7 - Циркуляционная схема водогрейного котла ПТВМ-30М (КВ-ГМ-30-150)

В последнее время выпуск водогрейных котлов осуществляется на основе унифицированных серий по Г- и П-образной схеме. Серия унифицированных водогрейных котлов для работы на газе, жидком и твердом топливах разработана ЦКТИ совместно с Дорогобужским и Барнаульским котельными заводами. На рисунке 10.8 показан котел типа КВ-ГМ (котел водогрейный, газомазутный).

Такие котельные установки выпускают тепловой мощностью 4,65; 7,56; 11,63; 23,3 и 35 МВт. Имея единый профиль (по схеме Г) и одинаковые

ширину и высоту, они различаются глубинами топочной камеры и конвективной шахты. Сжигание топлива осуществляется с помощью одной газомазутной ротационной горелки необходимой тепловой мощности с автономным вентилятором. Для очистки от загрязнений наружных поверхностей труб конвективной шахты (при работе на мазуте) применяют дробеочистную установку. Газомазутные котлы на 58,2 и 116,3 МВт имеют П-образную компоновку и соответственно две и три газомазутные горелки с ротационными форсунками.

Показанный на рисунке 10.8 котел КВ-ГМ-20-150 (тепловой мощностью 23,3 МВт, подогрев воды до 150°C) имеет топочную камеру, полностью экранированную трубами 60x3 мм с шагом 64 мм. Промежуточным задним экраном, состоящим из двух рядов труб, топка разделена на камеру горения и камеру дожигания. Конвективные поверхности нагрева котла расположены в вертикальном газоходе с полностью экранированными стенами. Передняя и задняя стены выполнены из труб диаметром 60 x 3 мм с шагом 64 мм, боковые стены - из вертикальных труб диаметром 83 x 3,5 мм с шагом 128 мм. Конвективные поверхности набираются из U-образных ширм из труб Ø 28 x 3 мм. Расход воды, подогреваемой от 70 до 150 °С, составляет 247 т/ч. При работе на газе расчетный КПД котла 89,8 %.

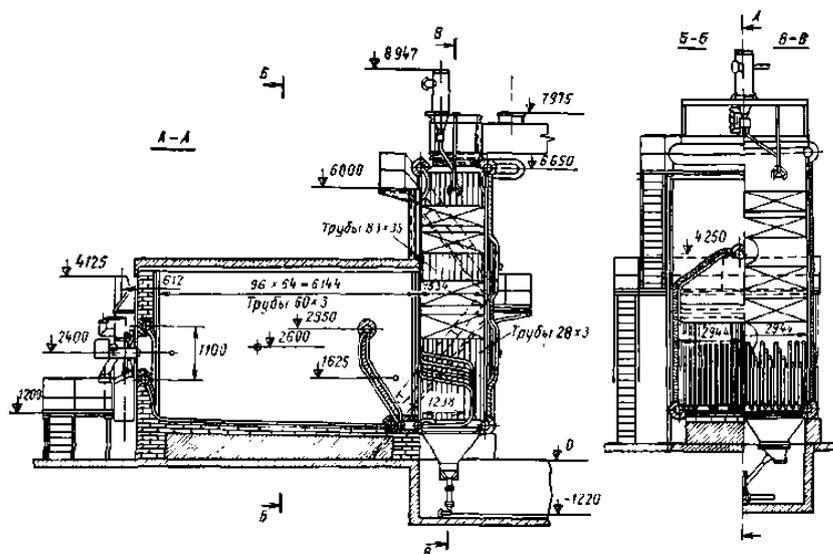


Рисунок 10.8 - Водогрейный газомазутный котел КВ-ГМ-20-150

Для водо- и пароводогрейных котлов, как и для паровых, температура воды на входе должна быть выше температуры точки росы для продуктов сгорания во избежание интенсивной наружной коррозии труб. В связи с этим температура воды на входе в водо- и пароводогрейные котлы должна быть не ниже 60 °С при работе на природном газе, 70 °С - при работе на малосернистом мазуте и не ниже 110 °С - при работе на высокосернистом мазуте. Учитывая, что поступающая из теплосети обратная (холодная) вода имеет обычно температуру ниже 60 °С, часть прямой (горячей) воды с помощью рециркуляционных насосов подмешивают к обратной воде для достижения необходимой температуры воды на входе в агрегат.

Значительная интенсификация работы водогрейных котлов с уменьшением расхода металла на их изготовление и сокращением габаритов достигается при применении циклонных предтопок для сжигания газа и мазута.

Актуальной проблемой для металлургических заводов, проводящих замену устаревших плавильных агрегатов и нагревательных печей на современное оборудование (например, мартеновских печей – на конвертора и дуговые печи), является необходимость продления срока службы котлов-утилизаторов в утилизационных котельных. Сотрудники кафедры ТиЭС, совместно с сотрудниками ПАО «ММК», предложено [30] реконструировать котлы утилизаторы типа КУ в водогрейные котлы, снабдив их экранированной топкой с горелками. Опыт работы таких котлов на коксовом газе показал их высокую экономичность и возможность продления срока эксплуатации.

### **10.9. Гидродинамика водогрейных котлов**

Водогрейные котлы обычно выполняют с прямоточным движением воды. Конструктивно поверхности нагрева состоят из труб малого диаметра в виде вертикальных экранных панелей, расположенных на стенках топочной камеры, и горизонтальных пакетов змеевиков, размещенных за топкой.

Гидравлическое сопротивление в системе поверхностей нагрева

преодолевается за счет давления, создаваемого сетевыми насосами, подающими воду из теплосети после ее охлаждения. Движение воды в трубах описывается уравнением:  $\Delta p_{\text{нив}} = \gamma l$ . Перепад давления в элементах поверхностей нагрева определяется по уравнениям для отдельных участков:  $\Delta p_{\text{уч}} = \Delta p_{\text{ш}} + \Delta p_{\text{тр}} + \varepsilon \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{нив}} + \Delta p_{\text{уск}}$  (где в порядке перечисления потери давления в шайбе, на трение, в местных сопротивлениях, нивелирные и на ускорение потока, Па). В результате тепловой и гидравлической неравномерности при подогреве воды до температуры, близкой к температуре насыщения пара, при данном давлении и при малых скоростях движения потока воды в отдельных трубах экранных панелей и горизонтальных змеевиков пакетов могут возникнуть парообразование и неустойчивый гидравлический режим, следствием этого может быть недопустимое повышение температуры металла наиболее теплонагруженных труб и возникновение гидравлических ударов.

Для выявления распределения потоков воды в параллельно включенных трубах экранных панелей и змеевиковых пакетах для каждого циркуляционного контура строится его гидродинамическая характеристика  $\Delta p = f(w_p)$ .

Гидродинамические характеристики экранной панели с подъемно-опускным движением воды при различных тепловых нагрузках в области малых значений массовых расходов воды имеют минимум потерь давления, что характеризует область неустойчивой гидродинамики в трубах. Повышение тепловой нагрузки вызывает возникновение неустойчивой гидродинамики при более высокой массовой скорости воды. Область при массовых скоростях  $w_p = 600-900 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  относится к области работы с наличием парообразования в отдельных трубах с возникновением при этом гидравлических ударов. При давлении в котле 0,7-0,9 МПа, скорости потока воды 1,4-1,6 м/с и удельных тепловых нагрузках до 350-400 кВт обеспечивается устойчивая гидродинамическая характеристика без образования пара в поверхностях нагрева. Установка шайб при параллельных

циркуляционных контурах и труб в экранах и горизонтальных пакетов при указанных скоростях потока не требуется.

### **10.10. Паровые и водогрейные котлы фирмы Виссманн**

Группа предприятий Виссманн (Viessmann Werke GmbH & Co) является одной из самых значительных зарубежных фирм на рынке отопительной техники (e-mail: [info@viessmann.com](mailto:info@viessmann.com)). Главный управляющий фирмы доктор Мартин Виссманн представляет третье поколение ее руководства. Компания имеет главный офис и заводы в г. Аллендорф (Германия) и годовой оборот около 980 миллионов евро, насчитывает около 6700 сотрудников (на 2006 г). Viessmann производит теплотехническое оборудование на 10 заводах в Германии и за ее пределами. Для поддержания интернационального духа компании и для того, чтобы быть ближе к потребителю, в Германии и 33 других странах мира существуют 106 филиалов сбыта (в том числе в России). Производственная программа включает отопительные котлы и парогенераторы мощностью от 4 до 15000 кВт на жидком, газообразном и твердом топливе, а также оборудование для котельных установок.

Низкотемпературный водогрейный котел **Vitola 100** с номинальной мощностью 15-63 кВт оснащен горелкой Vitoflame 200 и имеет нормативный КПД 94 % (рисунок 10.9, а). Котел снабжен теплообменными поверхностями типа «Comferral» с высокой эксплуатационной надежностью и длительным сроком службы. Двухслойные поверхности теплообмена из чугуна и стали предотвращают образование конденсата водяных паров в дымовых газах в хвостовой части котла. Эффективная теплоотдача к котловой воде достигается за счет широких проходов и большого водонаполнения котлового блока. Достаточная простота очистки котлового блока возможна благодаря широким, гладким и сквозным газоходам. Сжигание топлива осуществляется с малым выделением вредных веществ за счет использования горелки Vitoflame 200 (жидкотопливной, со сжиганием по принципу Duozone) и оптимальной конфигурации камеры сгорания. Горелки проходят цикл компьютеризированных огневых испытаний и оптимально согласованы по



сроком службы. Нормативный КПД котла – 94 %. Теплообменные поверхности типа **Eutectoplex** имеют высокую эксплуатационную надежность и длительный срок службы. Гомогенная структура специального эвтектического серого чугуна обеспечивает равномерность теплового потока и предотвращает растрескивание вследствие внутренних напряжений. Возможен экономичный и экологически щадящий режим использования за счет снижения температуры котловой воды при повышении температуры окружающей среды. Система **JetFlow** направляет поток охлажденной обратной сетевой воды через весь котел и предотвращает тем самым образование конденсата на стороне дымовых газов. Реализуется эффективная теплоотдача к котловой воде широкими проходами и большим водонаполнением котлового блока. Наблюдается простота обслуживания котла за счет горизонтального расположения ходов и легко извлекаемых вибраторов. Все три хода доступны с фронтальной стороны для чистки и контроля.

Низкотемпературный чугунный водогрейный трехходовой котел марки **Vitorond 200** с номинальной мощностью 40-100 кВт имеет сегментное исполнение и высокую экономичность, эксплуатационную надежность и значительный срок службы. За счет системы **JetFlow** для равномерного распределения температур в обратном потоке направляют поток охлажденной обратной сетевой воды через весь котел и предотвращают тем самым образование конденсата на стороне дымовых газов. Нормативный КПД – 94 %. Реализуется эффективная теплоотдача к котловой воде широкими проходами и большим водонаполнением котлового блока. Теплообменные поверхности типа **Eutectoplex** имеют гомогенную структуру специального эвтектического серого чугуна, обеспечивающую высокую равномерность теплового потока и предотвращение растрескивания вследствие внутренних напряжений. Чугунные сегменты с системой соединений в шпунт и гребень и эластичные прокладки для длительного уплотнения со стороны дымовых газов (рисунок 10.10, б).

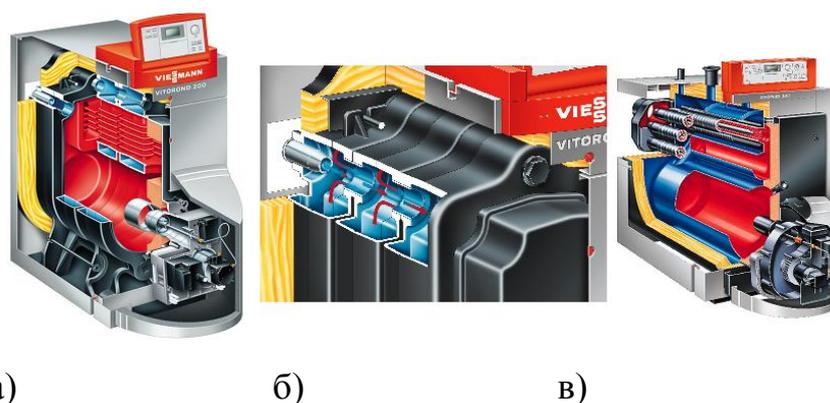


Рисунок 10.10 - Разрезы теплообменных поверхностей водогрейных котлов Vitorond 200 (а, б) и Vitoplex 300 (в)

Низкотемпературный чугунный водогрейный котел марки **Vitorond 200** с номинальной мощностью 125-270 кВт для работы на жидком или газообразном топливе благодаря сегментному исполнению легко размещается и монтируется в любом помещении. Его трехходовое исполнение обеспечивает сжигание с малым выделением вредных веществ. Теплопередающие поверхности Eutectoplex имеют гомогенную структуру из специального эвтектического серого чугуна, обеспечивают равномерность теплового потока и предотвращают разрушение материала за счет внутренних напряжений. Нормативный КПД - 94 %, но возможно увеличение его на 12 % за счет использования тепла конденсации водяных паров в уходящих газах с применением газовой теплообменной аппаратуры Vitotrans 333 из нержавеющей стали. Трехходовой котел имеет низкую теплонапряженность камеры сгорания, за счет чего обеспечивается низкая концентрация оксидов азота в выбросах. Оптимальное сжигание с низким выбросом вредных веществ обеспечивается двухступенчатой горелкой Vitoflame 100, отрегулированной в заводских условиях и проверенной в работе с помощью специальной компьютерной программы.

Низкотемпературный чугунный водогрейный котел марки **Vitorond 200** с номинальной мощностью 320-1080 кВт на жидком или газообразном топливе благодаря сегментному исполнению легко размещается и монтируется в любом помещении. Его трехходовое исполнение и низкая

теплонапряженность камеры сгорания обеспечивают сжигание с малым выделением вредных веществ. Теплопередающие поверхности Eutectoplex с гомогенной структурой специального эвтектического серого чугуна обеспечивают равномерность теплового потока и предотвращают разрушение материала за счет внутренних напряжений и являются гарантией высокой эффективности и надежности в эксплуатации. Нормативный КПД - 94 %, причем возможно увеличение его на 12 % за счет использования тепла конденсации водяных паров в уходящих газах с применением газовой теплообменного аппарата Vitotrans 333 из нержавеющей стали.

Низкотемпературный стальной водогрейный трехходовой котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitoplex 300** с номинальной мощностью 80-460 кВт (рисунок 10.10, в) благодаря многослойным конвективным теплообменным поверхностям отличается экономичностью, экологической чистотой и надежностью в работе. Многослойные конвективные теплообменные поверхности обеспечивают надежность в работе и долгий срок службы. Нормативный КПД с учетом среднегодового температурного цикла составляет 96 %, а при подключении к котлу теплообменника из нержавеющей стали утилизируется теплота конденсации водяных паров в продуктах сгорания и КПД возрастает еще на 12 %. Газосборник не приварен непосредственно к омываемой водой стенке котла, а закреплен на выдающихся из котла трубах Triplex, что способствует предотвращению конденсации водяных паров в уходящих газах.

Низкотемпературный стальной водогрейный трехходовой котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitoplex 300 TZ** с номинальной мощностью 895-1750 кВт благодаря многослойным конвективным теплообменным поверхностям отличается экономичностью, экологической чистотой и надежностью в работе. Нормативный КПД - 96 %, а в режиме с утилизацией теплоты конденсации водяных паров в отходящих газах – 108 %. Двухсекционное исполнение облегчает монтаж и транспортировку в помещение котельной.

Низкотемпературный стальной водогрейный трехходовой котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitoplex 300** с номинальной мощностью 575-1750 кВт имеет многослойные конвективные теплообменные поверхности котел. Нормативный КПД - 96 %, а при утилизации теплота конденсации водяных паров из отходящих газов в газо-водяном теплообменнике из нержавеющей стали он возрастает до 108 %. Особенности применения контактных теплоутилизаторов или контактных экономайзеров впервые были рассмотрены Ю.П. Сосниным [31-33] и И.З. Ароновым [34].

Низкотемпературный стальной водогрейный котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitoplex 100** с номинальной мощностью 80-460 кВт (рисунок 10.11, а) обеспечивает экономичный и экологически щадящий режим программируемой теплогенерации с переменной температурой теплоносителя. Нормативный КПД, с учетом среднегодового температурного цикла, равен 94 %. При подключении к котлу контактного теплообменника из нержавеющей стали Vitotrans 333 с нагревом воды отходящими газами утилизируется теплота конденсации водяных паров в продуктах сгорания и нормативный КПД возрастает еще на 12 %. В данном котле снимаются ограничения по минимальному расходу теплоносителя через котел, так как широкие проходы между жаровыми трубами и большое водонаполнение котлового блока обеспечивают эффективную естественную циркуляцию и гарантированный теплосъем со стороны котловой воды. В результате упрощается гидравлическая стыковка котла с системой. Низкая загрузка камеры сгорания обеспечивает сжигание с низким выходом  $\text{NO}_x$ . Оптимальный режим сжигания топливной смеси и минимальные выделения вредных веществ достигается за счет использования двухступенчатых горелок для жидкого и газообразного топлива с поддувом Vitoflame 100.

Низкотемпературный стальной водогрейный котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitoplex 100** с номинальной мощностью 90-500 кВт (рисунок 10.11, б) снабжен интегрированной пусковой схемой Therm-Control, значительно увеличивающей срок службы и повышающей



сгорания, что обеспечивает минимальное выделение вредных веществ и нормативный КПД до 91 %. Повышенное паровое пространство и значительная площадь зеркала испарения способствуют повышению качества пара. Широкие проходы между жаровыми трубами и большое водонаполнение котлового блока обеспечивают эффективную естественную циркуляцию и гарантированный теплосъем со стороны котловой воды, обеспечивая высокую эксплуатационную надежность и длительный срок службы. Так как паровое пространство встроено в обшивку котла, то благодаря этому наблюдаются малые потери тепла и отпадает необходимость в отдельной теплоизоляции. Возможна быстрая переналадка на режим приготовления горячей воды.

Парокомпрессионный тепловой насос марки **Vitocal 300 Typ BW** с номинальной тепловой мощностью 4,8-81,2 кВт (рисунок 10.12, а). Первичный контур - рассол, вторичный контур - вода. Тепловой насос отбирает тепло у грунта с помощью специальных коллекторов или зондов и может поддерживать теплоснабжение круглогодично. Может использоваться в двух водогрейных режимах: монорежиме - с полным покрытием нагрузки отопления и горячего водоснабжения или в бирежиме - в паре со вторым теплогенерирующим устройством (водогрейным котлом или солнечной установкой). Достигает высокого коэффициента мощности - до 4,61 при температурах: рассола - 0 °С; подающей магистрали - 35 °С. Особенно эффективен при работе на низкотемпературном графике, например для внутрипольного отопления. Высокая надежность работы, удобство эксплуатации и пониженный уровень шума достигаются за счет использования полностью герметичного компрессора **Compliant Scroll** с двойной системой шумоглушения (рисунок 10.12, б).



Рисунок 10.12 - Общий вид парокompрессионного теплового насоса марки Vitocal 300 (а) и герметичного компрессора (б)

Парокompрессионный тепловой насос марки **Vitocal 300 Typ WW** с номинальной тепловой мощностью 6,3-106,8 кВт. Первичный контур - вода, вторичный контур - вода. Водо-водяной тепловой насос отбирает тепло у грунтовых вод, имеющих стабильную температуру, и достигает за счет этого высоких коэффициентов мощности, даже в холодное время года. Может работать в паре с водогрейным котлом для покрытия нагрузки отопления и горячего водоснабжения. Коэффициент мощности - до 5,6 при температурах: грунтовой воды - 10 °С; подающей магистрали - 35 °С.

Парокompрессионный тепловой насос марки **Vitocal 300 Typ AW** с номинальной тепловой мощностью 5,4-14,6 кВт. Первичный контур - воздух, вторичный контур - вода. Коэффициент мощности - до 3,31 при температурах: воздуха - 2°С; подающей магистрали - 35°С. Воздушно-водяной тепловой насос использует тепло нагретого солнцем воздуха. В холодное время года может быть подключен второй источник тепла в виде водогрейного котла.

Газовый конденсатный настенный модуль с модулируемой горелкой-излучателем из нержавеющей стали марки **Vitodens 100** имеет номинальную тепловую мощность 8,8-25,6 кВт. Применяется конденсатная техника с использованием дополнительного теплосодержания дымовых газов, которая

в случае обычного котла уходит в трубу. Нормативный КПД котла - 107 %. Реализуется низкое электропотребление за счет использования дутьевого вентилятора с регулируемой частотой вращения и многоступенчатого насоса отопительного контура. Высокая эксплуатационная надежность и долгий срок службы достигается за счет устойчивых к агрессивной среде конденсата обогащенных кремнием поверхностей нагрева.

Газовый конденсатный настенный модуль марки **Vitodens 200** имеет модулируемую горелку MatriX-compact, поверхности теплообмена Inox-Radial и номинальную тепловую мощность 4,5-35,0 кВт (рисунок 10.13, а). Высокоэффективный конденсатный котел с поверхностями нагрева из легированной нержавеющей стали. Нормативный КПД - 109 %.

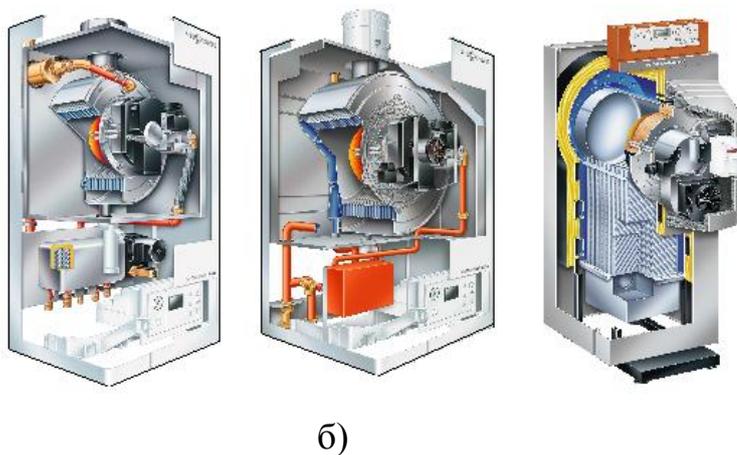


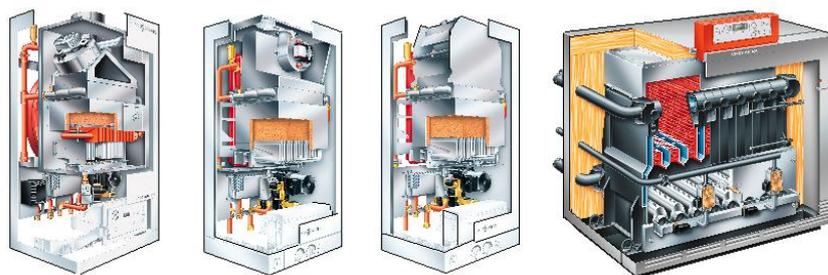
Рисунок 10.13 - Разрезы газовых конденсатных водогрейных котлов марки Vitodens 200 (а, б) и марки Vitocrossal 300 (в)

Газовый конденсатный настенный модуль марки **Vitodens 200** с номинальной тепловой мощностью 48,6-66,3 кВт имеет модулируемую горелку MatriX-compact и поверхности теплообмена Inox-Radial (рисунок 10.13, б). Нормативный КПД - 109 %. Теплообменник со спиральными поверхностями Inox-Radial имеет низкое гидравлическое сопротивление, минимальный уровень шума и потерь тепла в режиме поддержания готовности, за счет полного водяного охлаждения фронтальной стенки.

Газовый конденсатный котел марки **Vitocrossal 300** с номинальной тепловой мощностью 87-142 кВт имеет модулируемую горелку MatriX (рисунок 10.13, в). Конструкция напольного котла с большим

водонаполнением и вертикально расположенными теплообменными поверхностями Inox-Crossal из нержавеющей стали обеспечивает особенно эффективное использование тепла конденсации водяных паров и физической теплоты дымовых газов. Нормативный КПД - 109 %. Образующийся конденсат беспрепятственно стекает вниз с теплообменных поверхностей, причем нет опасности превышения концентрации кислот из-за вторичного испарения конденсата. Наблюдается усиленный эффект самоочищения за счет гладких поверхностей. Повышенное давление газа на выходе из котла обеспечивает возможность использования газоотводящих систем большой длины.

Газовые котлы марки **Vitopend 100 типа WHE** с атмосферными горелками имеют номинальную тепловую мощность 10,5-24 кВт (рисунок 10.14, а). Котел выполнен в виде настенного водогрейного модуля с модулируемой горелкой с водяным охлаждением и предварительным подмесом воздуха, благодаря чему сжигание происходит с минимальным выделением вредных веществ. Нормативный КПД котла 93%. Котел предназначен для работы как в режиме с постоянной температурой подачи, так и в погодозависимом режиме.



а)

б)

в)

г)

Рисунок 10.14 - Разрезы газовых водогрейных котлов марки Vitopend 100 типа WHE (а), марки Vitopend 100 типа WHO (б, в) и марки Vitogas 100 (г)

Газовые котлы марки **Vitopend 100 типа WHO** имеют номинальную тепловую мощность 10,5-24 кВт (рисунок 10.14, б, в). Нормативный КПД котла - 93 %. Высокая степень эффективности достигается за счет

встроенного проточного нагревателя для ГВС, при высокой скорости нагрева до заданной температуры горячей воды.

Низкотемпературный газовый водогрейный котел марки **Vitogas 100** с атмосферной горелкой с предварительным подмесом воздуха имеет номинальную тепловую мощность 11-60 кВт. Нормативный КПД котла - 93 %. Высокая эксплуатационная надежность и долгий срок службы достигается за счет теплообменных поверхностей из специального серого чугуна. Одноступенчатая атмосферная горелка обеспечивает сжигание с минимальным выделением вредных веществ. Экономичный и экологически щадящий режим использования реализуется за счет снижения температуры котловой воды при повышении температуры окружающей среды.

Низкотемпературный газовый водогрейный котел марки **Vitogas 100** с номинальной тепловой мощностью 72-144 кВт имеет атмосферную горелку с предварительным подмесом воздуха (рисунок 10.14, г). Высокая эксплуатационная надежность и долгий срок службы достигаются за счет теплообменных поверхностей из специального серого чугуна. Атмосферная горелка обеспечивает сжигание с минимальным выделением вредных веществ. Низкий расход топлива возможен за счет плавного снижения температуры котловой воды. Нормативный КПД котла - 93 %. Возможна интеграция в систему обслуживания «умного» дома по шине LON.

Низкотемпературный газовый водогрейный котел марки **Vitogas 050** с номинальной тепловой мощностью 35-60 кВт имеет атмосферную горелку с подводом воздуха двумя потоками. Нормативный КПД котла - 93 %. Высокая эксплуатационная надежность и долгий срок службы достигаются за счет теплообменных поверхностей из специального серого чугуна.

Низкотемпературный трехходовой водогрейный котел для жидкого и газообразного топлива марки **Vitomax 300** имеет номинальную мощность 1860-5900 кВт (рисунок 10.15).

Котел **Vitomax 300** предназначен для допустимой температуры подающей магистрали до 120 °С, для программируемой и погодозависимой

теплогенерации с переменной температурой теплоносителя. Допустимое избыточное рабочее давление 0,6 МПа. Имеет многослойные конвективные поверхности теплообмена из дуплексных жаровых труб и низкую теплонапряженность камеры сгорания. Экономичный расход энергии достигается за счет режима программируемой и погодозависимой теплогенерации с переменной температурой теплоносителя. Нормативный КПД (с учетом среднегодового температурного цикла) - 96 %. При подключении к котлу теплообменника системы отходящие газы-вода из нержавеющей стали Vitotrans 333 утилизируется теплота конденсации и нормативный КПД возрастает еще на 10 %. Возможны низкие минимальные температуры обратной магистрали: при работе на жидком котельном топливе 38°C, при работе на газе - 45°C.



Рисунок 10.15 - Разрез низкотемпературного трехходового водогрейного котла для жидкого и газообразного топлива марки **Vitomax 300**

Трехходовая схема газоходов котлового блока при низкой теплонапряженности камеры сгорания ( $\leq 1,2 \text{ МВт/м}^3$ ) обеспечивает минимальное выделение оксидов азота. Реализуется низкое сопротивление на стороне топочных газов благодаря конвективным теплообменным поверхностям с трубами для топочных газов больших размеров.

### 10.11. Пароводогрейные котлы

В отопительно-производственных котельных с малой тепловой нагрузкой в летнее время, в целях увеличения числа часов использования котлов, находят применение [35-36] комбинированные пароводогрейные

котлы для одновременного получения горячей воды и технологического пара, созданные на базе как водогрейных, так и паровых котлов.

На рисунке 10.16 показан комбинированный пароводогрейный котел, созданный на основе рассмотренного выше водогрейного котла ПТВМ-30М. В данном котле предусмотрена возможность использования части экранных поверхностей нагрева (боковых экранов) в качестве парообразующих элементов с работой по схеме с естественной циркуляцией. В качестве элемента, где происходит разделение воды и пара, использованы выносные циклоны. В случае необходимости эти поверхности нагрева могут использоваться как водогрейные, для чего необходимо осуществить соответствующие переключения в водопаровых контурах. Питание парообразующей части комбинированного котла может осуществляться от общей напорной линии сетевой воды без установки специальных питательных насосов, а также с использованием дополнительных питательных насосов. Качество добавочной питательной воды должно соответствовать требованиям, предъявляемым к питательной воде низкого давления. Суммарная тепловая нагрузка такого комбинированного котла 35-40 МВт. Отпуск пара составляет от 8 до 10 т/ч при давлении от 0,7 до 1,4 МПа. Режим котла регулируется по расходу горячей воды. При избыточной выработке пар автоматически поступает в устройства для подогрева обратной сетевой воды. Котел может работать в двух комбинированных режимах: с выдачей горячей воды и пара давлением 1,4 МПа в количестве 10 или 25 т/ч и в водогрейном режиме.

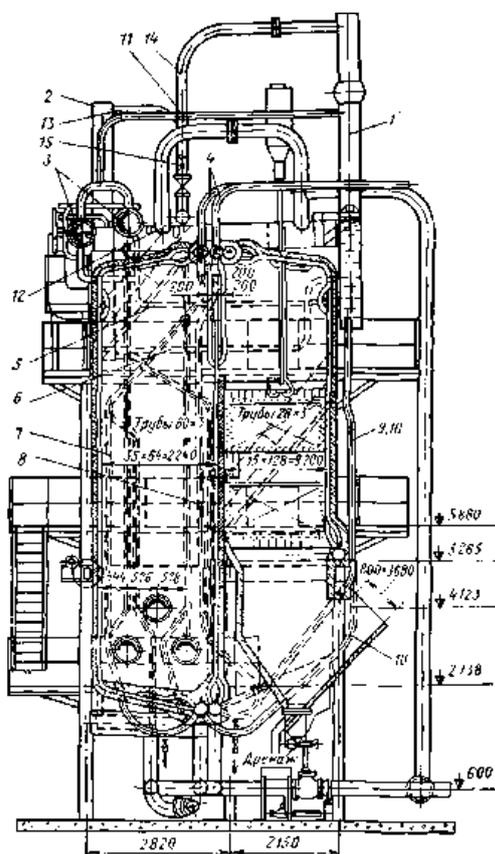


Рисунок 10.16 - Модернизированный комбинированный пароводогрейный котел КВ П-30/8: 1 - выносной циклон чистого отсека; 2 - выносной циклон солевого отсека; 3 - уравнильные емкости; 4 - пароотводящие трубы от фронтального и заднего экранов; 5 - питание чистого отсека из уравнильных емкостей; 6 - питание солевого отсека; 7, 8 - рециркуляционные трубы фронтального и заднего экранов; 9, 10 - опускающие трубы фронтального и заднего экранов; 11 - дыхательная труба уравнильных емкостей; 12 - сборный паровой коллектор; 13, 14 - отводы пара из чистого и солевого отсеков; 15 - отвод пара в магистраль.

Циркуляционная схема водогрейного контура модернизированного комбинированного котла КВП-30/8 показана на рисунке 10.17.

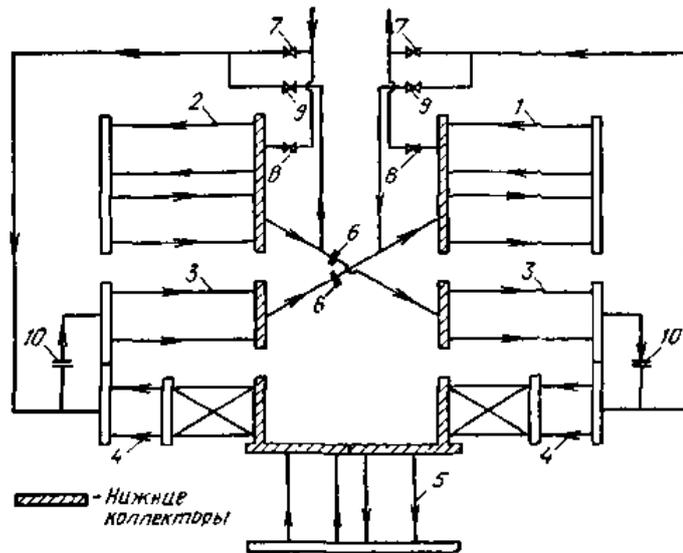


Рисунок 10.17. Циркуляционная схема водогрейного контура модернизированного пароводогрейного котла КПВ-30/8: 1 – фронтальной топочный экран; 2 – задний экран; 3 – боковые экраны; 4 – поверхности нагрева конвективной шахты; 5 – задний экран конвективной шахты; 6-9 – заглушки и задвижки на нижних трубопроводах котла; 10 – заглушка на верхних перекидных трубопроводах котла.

При отоплении котла газом суммарная тепловая нагрузка его составляет 46,5 МВт. При этом при включении всех топочных экранов в паровой контур паровая нагрузка может составить 35 МВт, а при включении только боковых топочных экранов - до 11 МВт.

В пароводогрейных котлах отпуск теплоты в виде горячей воды и пара может осуществляться в любых соотношениях. Однако выработка пара должна быть не менее 2 %, чтобы обеспечить удаление из котла неконденсирующихся газообразных веществ.

Если тепловая мощность пароводогрейного котла составляет  $Q_K$  (МВт), то количество сетевой воды  $G_B$  (кг/с), которое может быть в нем нагрето, определяется по формуле:

$$G_B = [Q_K - D(h_n - h_{вх})] / (h_{вых} - h_{вх}),$$

где  $D$  - расход пара, кг/с;

$h_n$  - энтальпия насыщенного пара, МДж/кг;

$h_{вх}$  и  $h_{вых}$  - энтальпия воды на входе и на выходе из котла, МДж/кг.

В настоящее время разрабатывают комбинированные пароводяные котлы, которые могут работать как в чисто водогрейном режиме, так и в чисто паровом.

Технико-экономические расчеты показывают, что себестоимость теплоты при выработке ее в комбинированных пароводогрейных котлах на 15-20 % ниже стоимости выработки ее в автономных паровых и водогрейных котлах. В комбинированных котлах удельный расход металла на выработку единицы теплоты в 3-4 раза ниже, чем в барабанных паровых котлах.

Использование мощных пиковых водогрейных котлов на ТЭЦ имеет существенный недостаток, связанный с сезонностью отопительной нагрузки и необходимостью консервации котла в летний период. На кафедре ТиЭС МГТУ для условий Теплоэлектроцентрали ОАО «ММК» разработан проект [37] по применению ГТУ с утилизацией тепла сбросных газов в водогрейном котле, что обеспечивает круглогодичную загрузку котла и повышает экономичность станции

#### **10.12. Эксплуатация котлов. Организация управлением котлами**

Организацией управления котлами называют структуру связей между объектом управления, обслуживающим персоналом и устройствами для контроля и управления объектом. Система управления котла должна обеспечивать его работу с заданными оптимальными технико-экономическими показателями. Решение этой задачи определяется совершенством комплекса оборудования котельной установки, а также квалификацией и опытом персонала.

Управление котельными установками применяется индивидуальное, групповое и централизованное. При индивидуальной системе управления каждый котел обслуживается дежурным с одним-двумя помощниками, которые выполняют все необходимые операции. Установка подачи в котел питательной воды, система топливоподачи и золоудаления имеют свой дежурный персонал. В котельных установках малой мощности обязанности этого персонала выполняют дежурные, обслуживающие котлы. При

групповом и централизованном управлении дежурный и его помощники обслуживают группу или все котельные установки данного объекта. Для обслуживания котельных установок средней и большой мощности кроме дежурных имеются также обходчики, которые контролируют работу элементов оборудования на месте их установки. При эксплуатации котельных установок малой и средней мощности преимущественно применяют частичную централизацию, т. е. индивидуальную и групповую системы управления. При этом необходимые устройства и приборы сосредотачивают на щитах управления, которые размещают на уровне основной площадки обслуживания котлов, а также на щитах управления питательной установкой, системы топливоподачи, золоудаления — на местах установки этого оборудования.

Развитие централизации управления на мощных электростанциях привело к обслуживанию всего оборудования блока котел — турбина, дежурным персоналом с одного щита управления и исключению цеховой структуры административного разделения электростанции.

В современных котельных установках система управления включает [38-45] следующие технические устройства-подсистемы: информационную; сигнализации; дистанционного и автоматического управления; автоматического регулирования; технологической защиты и блокировок.

Информационная подсистема обеспечивает непрерывный сбор, обработку и представление информации о работе и состоянии оборудования и ходе технологического процесса, получение информации вспомогательного характера, необходимой для изучения установки, а также для составления технической отчетности и расчета показателей работы котла. Эта подсистема включает первичные и вторичные приборы и устройства для представления информации.

Подсистема сигнализации включает устройства, представляющие персоналу информацию о нарушениях в режиме технологического процесса или работы агрегатов при помощи светового или звукового сигналов.

Сигнализация имеет функции привлечения внимания персонала к нарушению режимов работы агрегата или к аварийной ситуации и должна обеспечить понимание причины происходящего и исключить возможность ошибочных действий персонала. Технологическая сигнализация служит для предупреждения персонала о недопустимых отклонениях параметров; аварийная сигнализация дает представление о работе или останове механизмов.

Подсистема дистанционного и автоматического управления осуществляет дискретное воздействие на электрифицированные приводы механизмов и запорно-регулирующих органов. На современных котлах дистанционное управление достигает высокой степени централизации. Наиболее широко применяется индивидуальное дистанционное управление для каждого электропривода.

Подсистема автоматического регулирования является одной из важнейших частей системы управления, так как она создает основу для автоматизации процессов, происходящих в котельной установке, и является высшей ступенью системы управления. Автоматическое регулирование повышает экономичность и надежность работы котельной установки, поддерживает производительность и облегчает условия труда персонала. Автоматическое регулирование выполняет следующие основные функции: стабилизирует и поддерживает параметры на заданном уровне (например, уровень воды в барабане, температуру перегрева пара и т. п.); поддерживает соответствие между зависимыми величинами (например, соотношение топливо-воздух в процессе горения); изменяет регулируемую величину во времени по определенному закону (например, режим горения во время разогрева агрегата); поддерживает оптимальное значение регулируемой величины, так называемой функции оптимизации (например, режим процесса горения). Функции автоматического регулирования выполняют регуляторы различного типа. Наиболее распространена электронная система регулирования.

Подсистема технологической защиты и блокировки применяется для защиты от повреждений и предупреждения аварии. Устройство защиты действует при глубоких нарушениях технологического процесса или неисправностях оборудования, грозящих вызвать аварийную ситуацию. При этом автоматически осуществляются отключение отдельных неисправных элементов оборудования, снижение нагрузки или остановка агрегата. В качестве технических средств защиты используют обычные контрольно-измерительные приборы, имеющие контактную систему и работающие в комплекте с датчиками температуры, давления, расхода и т. п.

Степень оснащения рассмотренными подсистемами котельных установок определяется их назначением (производственные и отопительные котельные установки, котлы электростанций), мощностью и условиями работы. Общей тенденцией развития автоматизации котельных установок является переход от автоматизации отдельных процессов и операций к полной, комплексной их автоматизации, что особенно наглядно проявляется на мощных современных электростанциях.

Эксплуатация котлов должна обеспечивать надежную и экономичную выработку пара требуемых параметров и безопасные условия труда персонала. Для выполнения этих требований эксплуатация должна вестись в точном соответствии с законоположениями, правилами, нормами и руководящими указаниями, в частности в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов» Ростехнадзора, «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей», «Правилами технической эксплуатации теплоиспользующих установок и тепловых сетей» и др.

На основе указанных материалов для каждой котельной установки должны быть составлены должностные и технологические инструкции по обслуживанию оборудования, ремонту, технике безопасности, предупреждению и ликвидации аварии и т. п. Должны быть составлены технические паспорта на оборудование, исполнительные, оперативные и

технологические схемы трубопроводов различного назначения и схемы электрических соединений. Знание инструкций, режимных карт работы котла и указанных материалов является обязательным для персонала, и только при этом условии он может быть допущен к работе. Знания персонала должны систематически проверяться.

Эксплуатация котлов проводится по производственным заданиям, составляемым по планам и графикам выработки пара, расхода топлива, расхода электроэнергии на собственные нужды. Обязательно ведется оперативный журнал, в который заносят распоряжения руководителей и записи дежурного персонала о работе оборудования, а также ремонтную книгу, в которую записывают сведения о замеченных дефектах оборудования и мероприятиях по их устранению. Должны вестись первичная отчетность, состоящая из суточных ведомостей по работе агрегатов и записей регистрирующих приборов, и вторичная отчетность, включающая обобщенные данные по котлам за определенный период. Каждому котлу присваивается свой номер, все коммуникации окрашиваются в определенный условный цвет, установленный ГОСТ. Установка котлов в помещении должна соответствовать правилам Ростехнадзора, требованиям техники безопасности, санитарно-техническим нормам, требованиям пожарной безопасности и пр. Эксплуатация котла разделяется на периоды: подготовка и пуск в работу; обслуживание во время работы; останов работающего агрегата; содержание в нерабочем состоянии; ремонт агрегата. При ремонте агрегат находится в ведении ремонтного персонала, во все остальные периоды — в ведении дежурного персонала.

### **10.13. Подготовка и пуск в работу**

Порядок пуска и останова котла устанавливается инструкциями [46]. Перед растопкой производят его наружный осмотр, чтобы убедиться в исправности всех элементов оборудования и готовности к пуску. В частности, необходимо проверить исправность оборудования систем пылеприготовления, газового и мазутного оборудования топки, поверхностей

нагрева, обмуровки, системы золоулавливания и золоудаления, дымососов и вентиляторов, насосов, арматуры, гарнитуры и системы автоматизации котла. После монтажа или капитального ремонта должны быть произведены щелочение и промывка поверхностей нагрева. Перед растопкой все воздушные краны должны быть открыты, а все продувочные и спускные устройства закрыты, за исключением клапанов для продувки пароперегревателя и системы рециркуляции воды в экономайзере. Наполнение котла производится питательной деаэрированной водой с температурой в начале заполнения (60-70) °С и в конце - не выше 100 °С.

Неравномерный прогрев барабана котла при быстром заполнении его горячей водой может вызвать опасные температурные напряжения внутри его стенок.

Максимальные тангенциальные и осевые напряжения на внутренней поверхности барабана  $\sigma_i^{\text{макс}}$  (Па) определяют по формуле:

$$\sigma_i^{\text{макс}} = [\alpha E \cdot \Delta t / 2(1 - \mu)] \cdot \{ (1 / \ln \beta) - [\beta^2 / (\beta^2 - 1)] \},$$

где  $\alpha$  - коэффициент термического расширения стали, равный  $12 \cdot 10^{-6}$  мм/К;

$E$  - модуль упругости стали, равный  $(2-2,1) \cdot 10^4$  Па;

$\Delta t$  - разность температур поверхностей стенки, °С;

$\mu$  - коэффициент Пуассона (0,25-0,33);

$\beta$  - отношение наружного диаметра барабана к внутреннему.

Во избежание возникновения больших внутренних напряжений в металле барабана заполнение котла водой должно проводиться при среднем давлении в течение 1-1,5 ч и при высоком давлении в течение 1,5-2,5 ч. Заполнять котел водой следует до низшей отметки водоуказательного стекла, так как при начале испарения уровень ее повысится. Газоходы котла перед растопкой должны быть провентилированы в течение 10-15 мин за счет естественной тяги или включения в работу дымососа. После заполнения водой котла, вентиляции газоходов и продувки газопроводов зажигают газовые горелки, растопочные мазутные форсунки или слой топлива на решетке. Одновременно наблюдают за плотностью котла по уровню воды в

водоуказательном стекле. При повышении давления после того, как из воздушников и предохранительных клапанов начнет выходить пар, следует их закрыть. Продувка водоуказательных приборов производится при давлении 0,05-0,1 МПа. При наличии обходного газохода продукты сгорания пропускают помимо экономайзера. При отсутствии такой возможности должна быть включена линия рециркуляции воды. Во избежание коррозии воздухоподогревателя вентиляторы должны включаться при температуре продуктов сгорания за ним не менее 120°С или воздух должен пропускаться помимо него. Топочная камера должна прогреваться равномерно, для чего следует одновременно симметрично включать несколько горелок или форсунок. Растопка барабанного котла среднего давления должна производиться в течение 2-4 ч, высокого давления — в течение 4-5 ч, прямоточного котла — в течение 1-2 ч. Включение котла, если он работает на общий паропровод среднего давления, следует производить при давлении на 0,05-0,1 МПа, а высокого давления — на 0,2-0,3 МПа меньшем, чем в общем паропроводе. На рисунке 10.18 показан график растопки барабанного котла высокого давления.

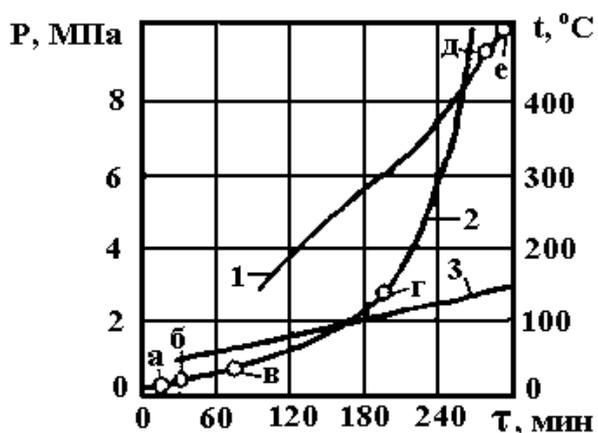


Рисунок 10.18 - График растопки барабанного котла высокого давления: 1 — давление пара; 2 — температура пара; 3 — температура уходящих газов; а — включение растопочных мазутных форсунок; б — пуск вентилятора; в — включение дымососа, мельничного вентилятора и питателя пыли; г — открытие паровой задвижки на пароперегревателе; д — включение котла в магистраль; е — прием нагрузки.

#### 10.14. Обслуживание во время работы

Ведение режима работы котла должно производиться персоналом по правилам безопасной эксплуатации [47-53] и по режимной карте, в которой указывают рекомендуемые технологические и экономические показатели его работы при различных нагрузках: давление и температура пара и питательной воды, содержание  $\text{RO}_2$  в газах, температуры газов и разрежения по газовому тракту; коэффициенты избытка воздуха и его давления по воздушному тракту и пр.

Наблюдаемые отступления от рекомендуемых режимов должны устраняться автоматически или воздействием персонала на регулирующие и запорные органы с помощью устройств дистанционного управления или на месте их установки. Производительность установки нужно регулировать таким образом, чтобы обеспечивался нормальный режим работы топки, исключаящий ее интенсивное шлакование и тепловой перекокс. На электростанциях согласно ПТЭ допускаемое колебание давления пара составляет  $\pm (0,3-0,5)$  МПа, температура перегретого пара равна  $\pm (10-15)$  °С при номинальном ее значении 440°С и  $\pm (5-10)$  °С при номинальных ее значениях 540-570 °С.

Регулирование температуры пара в некоторых пределах может производиться изменением положения факела в топке или коэффициента избытка воздуха. Наружные загрязнения поверхностей нагрева устраняют с помощью имеющихся устройств (обдувочных, вибрационных и дробевых) по разработанному графику. Контроль за состоянием загрязнений поверхностей нагрева осуществляется по температуре газов и сопротивлению газового тракта.

Необходимо следить за исправностью всего оборудования и не реже 1 раза в смену проверять исправность действия манометров, предохранительных клапанов и водоуказательных приборов. Оборудование должно поддерживаться чистым. Особое внимание должно быть обращено на устранение скоплений угольной пыли в помещении.

### 10.15. Останов котла

Производится по графику примерно в следующей последовательности: прекращается подача топлива из пылесистем, срабатывается пылевидное топливо в бункере; при слоевом сжигании прекращается подача топлива и дожигаются остатки его на решетке; отключается подача газа к горелкам и мазута в форсунки. После прекращения горения в топке отключают котел от паровой магистрали и открывают продувку пароперегревателя на 40-50 мин; медленно, в течение 4-6 ч, расхлаживают котел, после этого вентилируют газоходы с помощью естественной тяги, а также продувают котел. Через 8-10 ч после останова повторяют продувку и при необходимости ускорения охлаждения пускают дымосос; через 18-24 ч после останова при температуре воды 70-80°С допускается медленный спуск ее из котла. В период останова наблюдают за уровнем воды в барабане и при необходимости подпитывают водой котел.

При нарушении нормальной работы котла вследствие неисправностей, которые могут вызвать аварию, а также в случаях аварии котел должен быть немедленно остановлен [54-57]. Последовательность операций при аварийном останове котла остается такой же, как и при плановом. В частности, необходимо остановить котел в случаях повышения давления сверх допустимого, если оно продолжает увеличиваться, несмотря на принятые меры; упуска воды из барабана и переполнения его водой; прекращения действия всех водоуказательных приборов, манометров или питательных насосов; обнаружения существенных ненормальностей в работе котла — шума, ударов стуков вибрации, разрушения кладки и разогрева каркаса горения топлива в газоходах и т. п. При аварийном останове котел должен быть немедленно отключен от паровой магистрали.

При необходимости останова котла на длительный срок (более 10 сут) он должен быть предохранен от коррозии, возникающей вследствие воздействия кислорода и влаги воздуха. Преимущественно применяют следующие способы защиты: «сухой» способ, при котором внутри барабана и

поверхностей нагрева поддерживается отсутствие влаги в заполняющем их воздухе с помощью влагопоглотителей (хлористый кальций в количестве 1 кг/м<sup>2</sup>, известь — 2 кг/м<sup>2</sup> и т. п.); «мокрый» способ, при котором котел заполняется щелочным раствором (при наполнении питательной водой с содержанием 2 кг/м<sup>3</sup> едкого натра, 5 кг/м<sup>3</sup> три-натрийфосфата или 10 кг/м<sup>3</sup> кальцинированной соды); способ «избыточного давления», при котором за счет подвода пара от других котлов или периодического разогрева путем сжигания топлива в котле поддерживается давление выше атмосферного, что предотвращает доступ в него воздуха. Выбор способа защиты определяется местными условиями.

#### **10.16. Ремонт котла**

В процессе работы происходит неравномерный износ элементов и частей котла, вследствие чего необходимо систематически производить его ремонт: капитальный через каждые 2-3 года, а текущий - 1-2 года. По мере совершенствования оборудования и его эксплуатации объем ремонтных работ и период времени между ремонтами увеличивается [58-65].

Основными задачами ремонта котла и его вспомогательного оборудования являются устранение причин, вызывающих аварии или неполадки; смена изношенных или восстановление поврежденных деталей; проведение мероприятий по повышению надежности и экономичности работы агрегата и увеличению срока службы деталей и механизмов. Все ремонтные работы должны выполняться в соответствии со специальными инструкциями и указаниями.

Время, затрачиваемое на выполнение ремонта, различно и зависит от характеристики оборудования и объема выполняемых работ. Для котлов с давлением от 4 до 10 МПа простой в капитальном ремонте в зависимости от мощности допускается 14-20, котлов высокого давления — 18-20, а сверхвысокого давления и большой мощности — до 40 сут.

До ремонта должны быть выполнены все подготовительные работы и, в частности, составлены подробные ведомости дефектов, выявленных в

результате наружного и внутреннего осмотров оборудования, а также разработан сетевой график производства работ.

### **10.17. Надзор за котлами**

Надзор за котлами с целью предотвращения аварий осуществляется **Ростехнадзором** путем их освидетельствования в установленные сроки [66-67].

Существуют три вида освидетельствования: наружный осмотр, внутренний осмотр и гидравлическое испытание. Наружный осмотр осуществляется инспекторами без остановки котла не реже 1 раза в год. При наружном осмотре обследуются общее состояние агрегата и помещение, в котором он установлен, обращается внимание на состояние обмуровки, топки, паропроводов, арматуры и пр. Контролируется знание персоналом правил технической эксплуатации и инструкций. Внутренний осмотр производится не реже 1 раза в 4 года. Кроме общего состояния оборудования и его эксплуатации, проверяют состояние стенок барабанов и поверхностей нагрева, плотность газопроводов и пр. Гидравлическое испытание котла производят 1 раз в 8 лет. Перед гидравлическим испытанием проводят внутренний осмотр котла и освобождают от изоляции все швы барабанов, коллекторов штуцеров, фланцев и т. п.

Результаты освидетельствования и испытаний котла заносят в его паспорт, в котором должны быть описание установки, чертежи, заводские акты, результаты испытаний и данные завода на ее основные элементы. При неудовлетворительном состоянии установки инспектор Ростехнадзора имеет право запретить ее дальнейшую эксплуатацию [68-73].

#### Список литературы

1. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман и др.; под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 270 с.
2. Сидельковский Л.Н., Шурыгина А.П. Циклонные

- энерготехнологические установки. М.;Л.: Госэнергоиздат, 1962. 80 с.
3. Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности: учебник. Киев: Выща шк., 1986. 303 с.
  4. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов / Я.М. Щелоков, Э.М. Телегин, В.Н. Подымов и др. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1974. 214 с.
  5. Мезенцев А.П. Эффективность применения утилизаторов теплоты в огнетехнических установках. Л.: Недра, 1987. 126 с.
  6. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты: каталог-справочник. М.: НИИинформтяжмаш, 1973. 72 с.
  7. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман и др.; под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 270 с.
  8. Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические: каталог / Ю.А. Михедейко, С.В. Бердин, С.Н. Ивицкий и др. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1989. 104 с.
  9. Бережинский А.И., Хомутников Л.С. Утилизация, охлаждение и очистка конверторных газов. М: Металлургия, 1967. 216 с.
  10. Бережинский А.И., Циммерман А.Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конверторов. М.: Металлургия, 1975. 192 с.
  11. Бережинский А.И., Циммерман А.Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конверторов. М.: Металлургия, 1983. 271 с.
  12. Заявка 54-9566 Япония, С21С 5/38. Способ газификации сырья с применением конверторного газа. Оpubл. 05.10.1979.
  13. Заявка 59-569 Япония, С21С 5/38. Установка для обработки отходящих конверторных газов. Оpubл. 7.01.1984.
  14. Заявка 60-1362 Япония, С21С 5/38. Способ улавливания тепловой энергии отходящих конверторных газов. Оpubл. 24.12.1977.
  15. Заявка 57-15171 Япония, С21С 5/38. Способ использования теплосодержания конверторных газов. Оpubл. 29.03.1982.

16. Заявка 62-19482 Япония, С21С 5/38. Способ привода эксгаустера в устройстве для обработки конвертерного газа. Опубл. 28.04.1987.
17. Морозов А.П., Гайсин Р.К. Использование физической и химически связанной теплоты конвертерного газа // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 66.
18. Морозов А.П., Ставицкий М.С. Совершенствование энергохозяйства энергокорпуса ПСЦ ОАО «ММК» путем утилизации конвертерного газа и пара с ОГК на выработку электроэнергии // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 26.
19. Морозов А.П., Ахметов Р.Р. Совершенствование энергохозяйства энергокорпуса ПСЦ ОАО «ММК» путем утилизации конвертерного газа на перегрев пара с ОГК и использование его в парожеторных насосах установок внепечного вакуумирования // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 24.
20. Морозов А.П., Король А.В. Использование автономного пароперегревателя в энергокорпусе ПСЦ ОАО «ММК» в энергетических целях // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 39.
21. Бережковский М.И. Газгольдеры. М.: Химия, 1985. 109 с.
22. Пат. на полезную модель 34536 РФ, МКИ8 С21С 5/38. Устройство для утилизации конвертерного газа и пара с котла-охладителя конвертера / Никифоров Г.В., Пастушенко В.П., Агапитов Е.Б., Морозов А.П. (РФ).
23. Пат. на полезную модель 34539 РФ, МКИ8 С21С 7/10. Схема пароснабжения циркуляционной установки вакуумной обработки стали / Никифоров Г.В., Пастушенко В.П., Агапитов Е.Б., Морозов А.П. (РФ).
24. Андоньев С.М. Испарительное охлаждение металлургических печей.

- М.: Металлургия, 1970. 220 с.
25. Городецкий Я.И. Системы испарительного охлаждения металлургических агрегатов. М.: Металлургия, 1987. 120 с.
  26. Морозов А.П., Мусин И.Р. Модернизация ЧНД теплофикационных турбин с целью утилизации низкопотенциального пара в проточной части // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 32.
  27. Пиковые водогрейные котлы большой мощности / под ред. Н.И. Жирнова, Л.Б. Кроля. М.;Л.: Энергия, 1964. 168 с.
  28. Бузников Е.Ф., Сидоров В.Н. Водогрейные котлы и их применение на электростанциях и в котельных. М.;Л.: Энергия, 1965. 240 с.
  29. Газовые водогрейные промышленно-отопительные котлы / под ред. И.Я. Сигала. Киев: Техника, 1967. 145 с.
  30. Св. на полезную модель 28226 РФ. Водогрейный котел / Никифоров Г.В., Пастушенко В.П., Зуевский В.В., Матросова М.С., Агапитов Е.Б., Морозов А.П. (РФ).
  31. Соснин Ю.П. Газовые контактные водонагреватели. Пособие по расчету и проектированию. М.: Стройиздат, 1967. 268 с.
  32. Соснин Ю.П. Контактные водонагреватели. М.: Стройиздат, 1974. 359 с.
  33. Соснин Ю.П., Бухаркин Е.Н. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели. М.: Стройиздат, 1988. 375 с.
  34. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Л.: Недра, 1990. 280 с.
  35. Комбинированная выработка пара и горячей воды / Е.Ф. Бузников, А.К. Крылов, Л.А. Лесниковский; под ред. Е.Ф. Бузникова. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
  36. Пароводогрейные котлы для электростанций и котельных / Е.Ф. Бузников, А.А. Верес, В.Б. Грибов; под общ. ред. Е.Ф. Бузникова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 206 с.

37. Морозов А.П., Сорокин К.Е. Использование ГТУ с утилизацией тепла сбросных газов в водогрейном котле // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: материалы 8-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов / под ред. Б.К. Сеничкина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 28.
38. Галтыхин В.М., Славин М.Б. Эффективность эксплуатации автоматизированных отопительных котельных. М.: Недра, 1969. 128 с.
39. Лохматов В.М. Автоматизация промышленных котельных. Л.: Энергия, 1970. 207 с.
40. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. М.: Энергия, 1970. 280 с.
41. Хесин М.Я., Кваша Н.В., Жирнов Ф.Г. Автоматическое управление горелками мощных котлоагрегатов. М.: Энергия, 1979. 113 с.
42. Каминский В.М. Монтаж систем автоматизации котельных. М.: Энергия, 1980. 254 с.
43. Файерштейн Л.М., Этинген А.С., Гохбойм Г.Г. Справочник по автоматизации котельных. М.: Энергоатомиздат, 1985. 295 с.
44. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
45. Плетнев Г.П. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций: учебник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 408 с.
46. Цвынар Л. Пуск паровых котлов: пер. с польск. М.: Энергоиздат, 1981. 312 с.
47. Правила устройства и безопасной эксплуатации электрических котлов и электрокотельных: ПБ 10-228-98. Утв. 23.06.1992 / Госгортехнадзор России. М.: НЦ ЭНАС, 2002. 103 с.
48. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов с давлением пара не более 0,07 МПа, водогрейных котлов и

- водоподогревателей с температурой нагрева воды не выше 115 °С. Утв. 28.08.1992 / под ред. Г.М. Скольникова / Роскоммунэнерго. М.: НПО ОБТ, 1992. 68 с.
49. Елизаров П.П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях. М.;Л.: Госэнергоиздат, 1961. 400 с.
50. Маслов В.И. Эксплуатация котельных агрегатов на предприятиях черной металлургии. М.: Металлургия, 1965. 296 с.
51. Арефьев С.Д. Эксплуатация паровых котлов малой и средней мощности. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. 248 с.
52. Галкин В.И., Куликов В.Е. Эксплуатация и ремонт котельных установок: учебник. М.: Энергоатомиздат, 1983. 239 с.
53. Сергеев А.В. Справочное учебное пособие для персонала котельных. Тепломеханическое оборудование котельных. СПб.: Деан, 2002. 255 с.
54. Гуторов В.Г. Аварии и повреждения котельных агрегатов. М.;Л.: Госэнергоиздат, 1962. 96 с.
55. Аварии на объектах котлонадзора и меры по их предупреждению / В.В. Варфоломеев, А.М. Кондрашов, Н.А. Ласунев и др. М.: Недра, 1966. 175 с.
56. Баранов П.А. Предупреждение аварий паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 263 с.
57. Эстеркин Р.И. Противоаварийные тренировки в производственно-отопительных котельных. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 245 с.
58. Жилин В.Н., Семенов В.М. Ремонт парогенераторов. М.: Энергия, 1976, 352 с.
59. Справочник по ремонту котлов и вспомогательного котельного оборудования / под общ. ред. В.Н. Шастина. М.: Энергоиздат, 1981. 496 с.
60. Ремонт обмуровки паровых котлов / М.Н. Лесников, Н.В. Хрипливый, В.Н. Скориков и др. М.: Энергоиздат, 1982. 112 с.

61. Беляев А.А. Ремонт котлов высокого давления. М.: Энергоатомиздат, 1984. 222 с.
62. Серогородский В.М. Ремонт паровых котлов типа ДКВР. М.: Энергоатомиздат, 1985. 80 с.
63. Ремонт газоплотных паровых котлов / А.Д. Бурганов, Л.М. Ленин, Б.Т. Бабищ и др. М.: Энергоатомиздат, 1985. 72 с.
64. Баранов П.А. Эксплуатация и ремонт паровых и водогрейных котлов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 263 с.
65. Гофман Е.Я., Уланов Г.А., Чистяков В.И. Ремонтопригодность котельных установок. М.: Энергтоатомиздат, 1987. 88 с.
66. Методические указания по обследованию предприятий, эксплуатирующих паровые и водогрейные котлы, сосуды, работающие под давлением, трубопроводы пара и горячей воды: руководящие документы / Госгортехнадзор России. Введен 01.06.1993. М.: НПО ОБТ, 1993. 32 с.
67. Методические указания по проведению технического освидетельствования паровых и водогрейных котлов, сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды: руководящие документы / Госгортехнадзор России. Введен 01.06.1994. М.: НПО ОБТ, 1994. 36 с.
68. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеев и др. М.: Энергия, 1977. 297 с.
69. Панюшева З.Ф., Столпнер Е.Б. Наладка отопительных котлов, работающих на газе. Л.: Недра, 1986. 153 с.
70. Париллов В.А., Ушаков С.Г. Испытания и наладка паровых котлов: учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1986. 320 с.
71. Юренко В.В. Теплотехнические испытания котлов, работающих на газовом топливе. Л.: Недра, 1987. 176 с.
72. Кемельман Д.Н., Эскин Н.Б. Наладка котельных установок: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989. 319 с.

73. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля,  
Е.Д. Фингер, А.А. Авдеев и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 413 с.