

Раздел 9. ВЫХОД И ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛАКА И ЗОЛЫ. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ РАБОТЕ КОТЛОВ. Разделы РПД 9.1-9.2.

9.1. Выход шлака и его характеристики. Содержание вредных примесей в продуктах сгорания

В результате сжигания твердого топлива содержащаяся в нем зола частично остается в топке в виде шлака, а частично уносится продуктами сгорания [1, 2]. Золовой унос частично оседает в газоходах котла и улавливается в золоуловителе, частично удаляется вместе с дымовыми газами в атмосферу. В шлаке и уносе имеются частицы несгоревшего топлива. Шлак, удаляемый из топки, представляет собой крупные куски сплавленной стекловидной или хрупкой губчатой массы, а унос, осаждающийся в газоходах и золоуловителе,— сыпучую подвижную смесь частиц золы и несгоревшего топлива. Зола и шлак — ценное сырье для производства строительных материалов. Шлаки и зола могут быть использованы как добавка к цементу при производстве силикатного и алюмосиликатного кирпичей, шлакоблоков, камнелитейных изделий, огнеупоров, шлаковой ваты и др. На кафедре ТиЭС МГТУ разработана [3] технология получения теплоизоляционных пенозолобетонов на основе шлаков и зол в качестве вяжущих веществ и заполнителей.

Количество шлака и золы, которое необходимо удалять из котлов большой производительности, работающих на многозольном топливе, составляет сотни тонн в сутки. Поэтому шлакозолоудаление является трудоемким процессом. Некоторые операции шлакозолоудаления, если они выполняются вручную, опасны и вредны для персонала.

К системам шлакозолоудаления предъявляются следующие основные требования: безопасность работы и обеспечение нормальных санитарно-гигиенических условий труда для персонала; минимальные расходы на удаление шлака и золы, в частности расходы электроэнергии и воды; возможность дальнейшего использования шлаков и золы.

Процесс шлакозолоудаления можно разделить на две стадии: очистка шлаковых и зольных бункеров котла и золоуловителей от содержимого и транспорт шлака и золы. Последняя операция разделяется на транспорт шлака и золы от котлов за пределы котельной и их дальнейший транспорт на золоотвалы или к потребителям.

Общее количество шлака и золы, удаляемое из котлов $G_{\text{зш}}$ (кг/ч), составляет:

$$G_{\text{зш}} = 0,01 \cdot B_p [A^p + (q_4 \cdot Q_n^p / 32,7 \cdot 10^3)] \cdot \{1 - (\eta_{\text{зш}} / 100)\},$$

где B_p - расход топлива, кг/ч;

A^p - зольность топлива, %;

q_4 - потеря теплоты с механическим недожогом, %;

Q^p - теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$\eta_{\text{зш}}$ - КПД золоуловителя, %.

Соотношение количества шлака и золы определяется способом сжигания топлива и конструкцией топочного устройства. Примерное распределение шлака и золы, соответственно выход шлака; количество золы, осевшей в газоходах; количество золы, выносимой дымовыми газами из котла (все в % от общего количества золы и шлака) в зависимости от конструкции топки составляет: для топок слоевого сжигания – 80; 5-10; 10-15; для топок пылеугольного сжигания топлива с сухим шлакоудалением – 15-25; 10-15; 60-75; для топок пылеугольного сжигания топлива с жидким шлакоудалением – 40-55; 5-10; 35-55.

В зависимости от вида сжигаемого топлива плотность шлака составляет 2,2-2,6, а золы - 2,0-2,5 т/м³.

Более 50 % шлака имеют размеры частиц более 3 мм. Основная масса золы (до 85%) состоит из частиц размером 0,01-0,5 мм.

Для удаления шлака и золы из топок, золовых бункеров котлов и золоуловителей и далее из помещения котлов на золоотвал применяют [4, 5] механическую, пневматическую и гидравлическую системы шлакозолоудаления.

При механической системе шлакоудаления выгрузка шлака из бункеров осуществляется скребковыми транспортерами или шнеками, а золы — клапанами-мигалками или вращающимися лопастными затворами. Механические системы шлакозолоудаления применяются только для котельных установок малой мощности.

Пневматический транспорт шлака и золы основан на способности потока газов при достаточной скорости перемещать сыпучие материалы. Пневмошлакозолоудаление может быть осуществлено по нагнетательной и всасывающей схемам. В первом случае система находится под давлением, во втором - под разрежением. Применяют обычно системы, осуществляемые по всасывающей схеме, при которых в качестве транспортирующего агента используется воздух и вся система находится под разрежением (30-40 кПа), создаваемым паровыми эжекторами или вакуум-насосами. Пневмошлакозолоудаление применяют для котельных установок малой производительности при нецелесообразности устройства гидрозолоудаления, а также в случае необходимости получения сухого шлака и золы по условиям их дальнейшего использования. В котельных установках большой производительности пневматический транспорт золы применяют в сочетании с гидрозолоудалением.

В гидравлических системах шлакозолоудаления в качестве транспортирующего агента используется вода. Транспорт шлака и золы в помещении котлов производится в каналах без давления, и системы различаются способом внешнего транспорта смеси воды, шлака и золы (гидромассы) на золоотвал. Применяют преимущественно следующие системы внешнего транспорта гидромассы: совместный транспорт гидромассы шлака и золы по общим трубопроводам на золоотвал, отдельный транспорт гидромассы шлака и гидромассы золы по индивидуальным трубопроводам. При совместном транспорте для перекачки гидромассы применяют эжектирующие гидроаппараты или багерные насосы, а иногда гидропневматические эрлифт-насосы. При отдельном транспорте

металлоуловитель; 15 – багерный насос; 16 – трубы; 17 – шибер; 18 – предварительный металлоуловитель; 19 – кран; 20 – решетка; 21 - дробилка; 22 – дренажный насос

В каналы подается дополнительно вода под давлением через побудительные сопла. Гидромасса самотеком поступает из каналов в приемные бункера багерной насосной. В верхней части бункеров установлены решетки, через которые проходят зола и мелкий шлак; крупные же куски шлака размером более 60 мм задерживаются на решетке и направляются в валковые дробилки, а после дробления вместе с остальной гидромассой поступают через металлоуловитель в багерные насосы. Багерными насосами гидромасса по трубопроводам подается на золоотвал.

На рисунке 9.2. а, б показаны схемы отдельного гидрошлако-золоудаления с багерными и шламовыми насосами. Такие системы отличаются применением индивидуальных каналов, насосов и трубопроводов для отдельного транспорта шлака и золы.

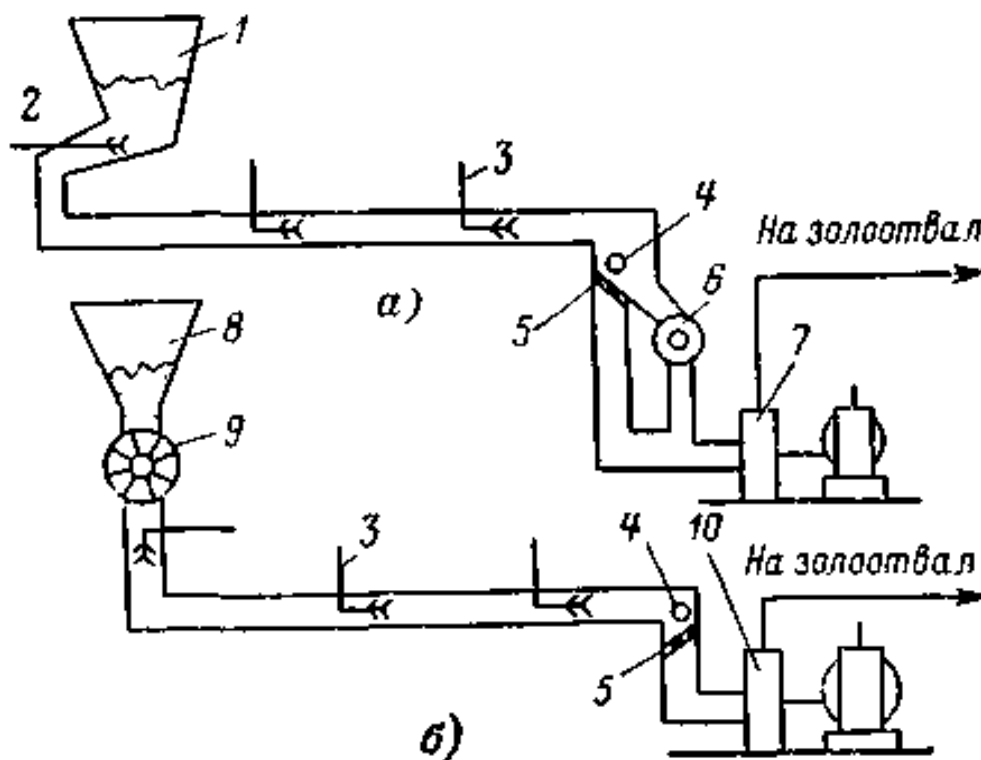


Рисунок 9.2 - Схема отдельного гидрошлако-золоудаления с багерными и шламовыми насосами: а – система шлакоудаления; б – система золоудаления;

1 – шлакосмывная шахта; 2 – шлакосмывное сопло; 3 - побудительные сопла в канале; 4 – металлоуловитель; 5 – решетка; 6 – шлакодробитель; 7 – багерный насос; 8 – золотой бункер; 9 - шлюзовый питатель золы; 10 – шламовый насос

Для транспорта золы от золотых бункеров до самотечных каналов системы, находящихся в помещении котлов, применяют пневматический транспорт. При совместной системе гидрошлакозолоудаления удельный расход электроэнергии составляет 30-60 кВт·ч/т, расход воды - 15-20 т/т, при отдельной системе - соответственно 20-30 кВт·ч/т и 12-20 т/т.

9.1.1. Загрязнение и очистка наружных поверхностей нагрева. Шлакование поверхностей нагрева

В процессе работы котла возникает загрязнение внешних поверхностей нагрева. При условии $T_r/T_{пл} < 1$ основная часть уноса за топкой находится в твердом состоянии (T_r - температура газов, $T_{пл}$ - температура плавления золы). На экранах и ширмах топки, работающей на пылевидном твердом топливе, возможны отложения шлака. Эти отложения образуются при температуре газов на выходе из топки более высокой, чем температура размягчения золы, а также в высокотемпературных зонах топки при неудовлетворительной аэродинамической организации топочного процесса в тех случаях, когда расплавленные частицы золы, не успевшие охладиться и затвердеть, набрасываются потоком газов на стенки топок и трубы экранов. Обычно шлакование начинается в промежутках между экранными трубами, а также в застойных зонах и участках топки. Если температура топочной среды в зоне образования шлаковых отложений ниже температуры начала деформации золы t_1 , то наружный слой шлака состоит из отвердевших частиц. При повышении температуры наружный слой шлака может оплавляться, что способствует налипанию новых частиц и прогрессирующему шлакованию. При температуре окружающей среды выше точки начала ждкоплавкого состояния t_3 наружный слой шлака будет оплавляться и дальнейшего его нарастания не будет, так как шлак будет

стекать со стенок топки. В таком режиме работают ошипованные экраны топок с жидким шлакоудалением.

Шлакование уменьшает тепловосприятие поверхностей нагрева, расположенных в топке, и повышает температуру продуктов сгорания на выходе из топки, что может привести к нарушению нормального гидродинамического режима работы экранов и ширм. В области пароперегревателя, если температура газов ниже t_1 , имеют место уплотненные отложения твердых частиц золы. Прочные отложения образуются при наличии в золе топлива свободной извести CaO , которая, соединяясь с SO_2 , образует сульфат кальция, связывающий между собой и поверхностью труб частицы золы.

В экономайзере образуются рыхлые сыпучие отложения мелких фракций золы, причем рост загрязняющего слоя сопровождается разрушением его более крупными частицами, в результате чего устанавливается динамическое равновесие и состояние загрязняющего слоя приобретает постоянный характер.

В зоне низких температур могут образовываться липкие связанные отложения. Переход от сыпучих к вязким отложениям в области низких температур, где может иметь место конденсация влаги, по-видимому, связан с тем, что в результате смачивания золы появляющейся серной кислотой образуется гипс — вещество с вяжущими свойствами.

Отложения золы на конвективных поверхностях нагрева образуются в основном на кормовых поверхностях труб, а при малых скоростях потока — и на лобовых их поверхностях. Более крупные частицы золы оседают на лобовых поверхностях, более мелкие, огибая трубы и попадая в вихревую зону, оседают на кормовых поверхностях.

Количество отложений на конвективных поверхностях нагрева зависит от скорости потока продуктов сгорания, геометрических характеристик поверхности нагрева и физических свойств золы. Число соприкосновений с трубами мелких частиц увеличивается прямо пропорционально скорости

потока, а разрушающие действия крупных частиц растут пропорционально кубу этой скорости. В итоге с увеличением скорости потока динамическое равновесие между процессами оседания золы и разрушения осевшего ее слоя наступает при меньших его размерах.

На рисунке 9.3 показана зависимость коэффициента загрязнения от скорости потока.

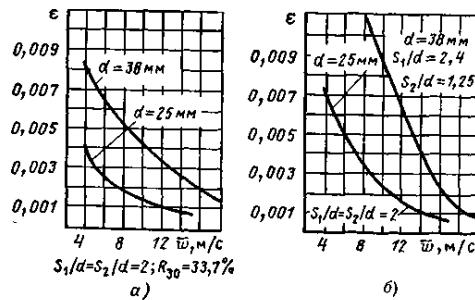


Рисунок 9.3 - Зависимость коэффициента загрязнения поверхности нагрева от скорости газа и конструкции пучка труб: а – шахматный; б – коридорный

Существенно влияют на загрязнение труб их диаметр, шаг между трубами, а также порядок их расположения — коридорный или шахматный. Уменьшение диаметра труб и продольного шага в трубных шахматных пучках значительно уменьшает их загрязнение. В коридорных пучках труб загрязнение больше, чем в шахматных.

Уменьшение размера частиц золы повышает загрязнение конвективных поверхностей нагрева. Однако частицы с размером менее 20 мкм практически не оседают на трубах. Крупные частицы золы оказывают разрушающее влияние на слой отложений золы.

Зольность топлива не влияет на толщину загрязнений; по достижении ими определенных пределов зола больше не осаждается на загрязненных трубах. Толщина липких загрязнений в области низких температур зависит от A^p и характеристик золы и прогрессирует во времени. Вследствие загрязнения конвективных поверхностей нагрева ухудшаются условия теплопередачи и возрастают их аэродинамические сопротивления. В результате повышается температура уходящих газов, увеличиваются потери q_2 и расход электроэнергии на тягу. Для нормальной и надежной работы

котлов необходимо поверхности нагрева поддерживать чистыми [6].

9.1.2. Очистка наружных поверхностей нагрева от загрязнений

В процессе эксплуатации котла для очистки экранных поверхностей нагрева применяют паровую и пароводяную их обдувку, а также вибрационную очистку. Для конвективных поверхностей нагрева используют паровую и пароводяную обдувку, вибрационную, дробевую и акустическую очистку или самообдувку. Наибольшее распространение имеют паровая обдувка и дробевая очистка. Для ширм и вертикальных пароперегревателей наиболее эффективной является вибрационная очистка. Радикальным является применение самообдувающихся поверхностей нагрева с малым диаметром и шагом труб, при которых поверхности нагрева непрерывно поддерживаются чистыми. Эффективность очистки поверхностей нагрева с помощью указанных устройств определяется коэффициентом изменения аэродинамического сопротивления газового тракта котла $\varepsilon = \Delta P_k / \Delta \tau$ и изменения его тепловой мощности $\varphi = \Delta Q / \Delta \tau$, где ΔP_k - увеличение сопротивления газового тракта котла, Па; ΔQ - уменьшение тепловой мощности котла, кВт; $\Delta \tau$ - период между очистками, ч. Увеличение коэффициентов ε и φ указывает на необходимость уменьшения периода времени между очистками.

9.1.2.1. Паровая обдувка

Очистка поверхностей нагрева от загрязнения может производиться за счет динамического воздействия струй воды, пара, пароводяной смеси или воздуха. Действенность струй определяется их дальностью. Зависимость относительной скорости струи при данном давлении от относительного ее расстояния применительно к воздуху, пару, пароводяной смеси выражается формулой:

$$(\omega_1/\omega_2) = f(l/d_2),$$

где ω_1 и ω_2 скорости на расстоянии l от сопла и на выходе из него; d_2 - выходной диаметр сопла.

Наибольшей дальностью и термическим эффектом,

способствующим растрескиванию шлака, обладает струя воды. Однако обдувка водой может вызвать переохлаждение труб экранов и повреждение их металла.

Воздушная струя имеет резкое снижение скорости, создает небольшой динамический напор и эффективна только при давлении не менее 4 МПа. Применение воздушной обдувки затруднено необходимостью установки компрессоров высокой производительности и давления.

Наиболее распространена обдувка с применением насыщенного и перегретого пара. Струя пара имеет небольшую дальность, но при давлении более 3 МПа ее действие достаточно эффективно. Давление у обдуваемой поверхности p (Па) определяется по формуле:

$$P = w_i^2 / 2v_i,$$

где w_i , v_i - осевая скорость и удельный объем обдувочной среды на расстоянии l от сопла. При давлении пара 4 МПа перед обдувочным аппаратом давление струи на расстоянии примерно 3 м от сопла составляет более 2000 Па.

Для удаления отложений с поверхности нагрева давление струи должно составлять примерно 200-250 Па для рыхлых золовых отложений; 400-500 Па для уплотненных золовых отложений; 2000 Па для оплавленных шлаковых отложений. Расход обдувочного агента для перегретого и насыщенного пара

$$G, \text{ кг/с: } G = c\mu d_k^2 (p_1/v_1)^{0,5},$$

где $c = 519$ для перегретого пара,

$c = 493$ для насыщенного пара;

$\mu = 0,95$;

d_k - диаметр сопла в критическом сечении, м;

p_1 - начальное давление, МПа;

v_1 - начальный удельный объем пара, м³/кг.

Аппарат для паровой обдувки топочных экранов показан на рисунке 9.4. В качестве обдувающего агента в этом устройстве и аппаратах аналогичной конструкции можно использовать пар при давлении до 4 МПа и температуре

до 400°С. Аппарат состоит из обдувочной трубы для подвода пара и механизма привода.

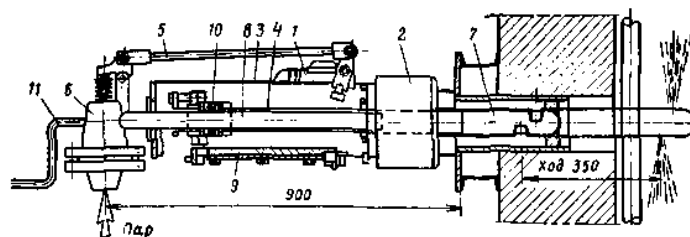


Рисунок 9.4 - Аппарат для паровой обдувки экранов: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – корпус; 4 – шпиндель; 5 – рычажной механизм; 6 – клапан; 7 – сопловая головка с двумя соплами; 8 – центральная неподвижная труба; 9 – направляющая; 10 - сальник; 11 – рукоятка.

Вначале обдувочной трубе сообщается поступательное движение. Когда сопловая головка вдвигается в топку, труба начинает вращаться. В это время открывается автоматически паровой клапан и пар поступает к двум диаметрально расположенным соплам. После окончания обдувки электродвигатель переключается на обратный ход и сопловая головка возвращается в исходное положение, что предохраняет ее от чрезмерного нагрева. Зона действия обдувочного аппарата до 2,5, а глубина захода в топку до 8 м. На стенках топки обдувочные аппараты размещаются так, чтобы зона их действия охватывала всю поверхность экранов.

Обдувочные аппараты для конвективных поверхностей нагрева имеют многосопловую трубу, не выдвигаются из газохода и только вращаются. Число сопел, расположенных с двух сторон обдувочной трубы, соответствует числу труб в ряду обдуваемой поверхности нагрева.

Для регенеративных воздухоподогревателей применяются обдувочные аппараты с качающейся трубой. Пар или вода подводится к обдувочной трубе, и вытекающая из сопла струя очищает пластины воздухоподогревателя. Обдувочная труба поворачивается на определенный угол так, что струя попадает во все ячейки вращающегося ротора воздухоподогревателя. Для очистки регенеративного воздухоподогревателя котлов, работающих на твердом топливе, в качестве обдувочного агента

применяется пар, а котлов, работающих на мазуте, — щелочная вода. Вода хорошо промывает и нейтрализует сернокислотные соединения, имеющиеся в отложениях.

9.1.2.2. Пароводяная обдувка

Рабочим агентом обдувочного аппарата служит вода котла или питательная вода. Аппарат представляет собой сопла, установленные между трубами экранов.

Вода в сопла подается под давлением, и в результате падения давления при прохождении через сопла из нее образуется пароводяная струя, направленная на противоположно расположенные участки экранов, фестонов, ширм. Большая плотность пароводяной смеси и наличие недоиспарившейся в струе воды оказывают эффективное разрушающее действие на отложения шлака, который удаляется в нижнюю часть топки.

9.1.2.3. Вибрационная очистка

Вибрационная очистка основана на том, что при колебании труб с большой частотой нарушается сцепление отложений с металлом поверхности нагрева. Наиболее эффективна вибрационная очистка свободно подвешенных вертикальных труб - ширм и пароперегревателей. Для вибрационной очистки преимущественно применяют электромагнитные вибраторы (рисунок 9-5).

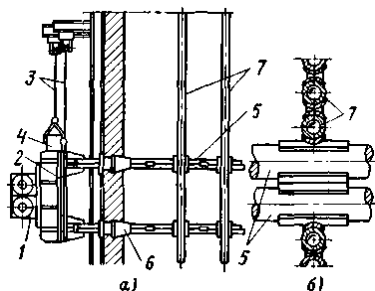


Рисунок 9.5 - Вибрационное устройство для очистки вертикальных труб: а – вид сбоку; б – сопряжение виброштанги с обогреваемыми трубками – вид сверху; 1 – вибратор; 2 – плита; 3 – трос; 4 – противовес; 5 – виброштанга; 6 – уплотнение прохода штанги через обмуровку; 7 – труба

Трубы пароперегревателей и ширм прикрепляют к тяге, которая выходит за пределы обмуровки и соединяется с вибратором. Тяга охлаждается водой, и место ее прохода через обмуровку уплотнено. Электромагнитный вибратор состоит из корпуса с якорем и каркаса с сердечником, закрепленных пружинами. Вибрация очищаемых труб осуществляется за счет ударов по тяге с частотой 3000 ударов в минуту, амплитуда колебаний 0,3-0,4 мм.

9.1.2.4. Дробеочистка

Данный способ применяется для очистки конвективных поверхностей нагрева при наличии на них уплотненных и связанных отложений. Очистка происходит в результате использования кинетической энергии падающих на очищаемые поверхности чугунных дробин диаметром 3-5 мм. Схема устройства для дробеочистки показана на рисунке 9.6.

В верхней части конвективной шахты котла помещаются разбрасыватели, которые равномерно распределяют дробь по сечению газохода. При падении дробь сбивает осевшую на трубах золу, а затем вместе с ней собирается в бункерах, расположенных под шахтой. Из бункеров дробь вместе с золой попадает в сборный бункер, из которого питатель подает их в трубопровод, где масса золы с дробью подхватывается воздухом и выносится в дробеуловитель, из которого дробь по рукавам вновь подается в разбрасыватели, а воздух вместе с частицами золы направляется в циклон, где происходит их разделение. Из циклона воздух сбрасывается в газоход перед дымососом, а зола, осевшая в циклоне, удаляется в систему золоудаления котельной установки.

Транспорт дроби осуществляется по всасывающей (рисунок 9.6, а) или нагнетательной (рисунок 9.6, б) схеме. При всасывающей схеме разрежение в системе создается паровым эжектором или вакуум-насосом. При нагнетательной схеме транспортирующий воздух подается в инжектор от компрессора. Для транспорта дроби необходима скорость воздуха 40-50 м/с.

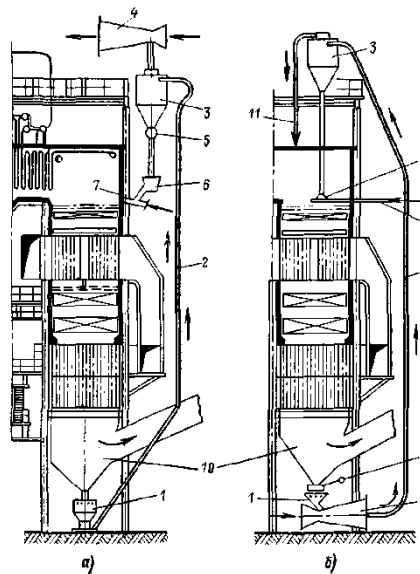


Рисунок 9.6 - Схемы дробеочистных установок: а – установка под разряжением с пневматическим забрасывателем дробы; б – установка под давлением с верхним забросом дробы; 1 – бункер для дробы; 2 – трубопровод для подачи дробы; 3 – дробеуловитель-циклон; 4 – эжектор; 5 - автоматический клапан-мигалка; 6 – тарельчатый питатель; 7 – расбрасыватель дробы; 8 – подвод охлаждающей воды; 9 – инжектор; 10 – выход продуктов сгорания; 11- выход воздуха из пылеуловителя

Расход дробы через систему $G_{др}$, кг/с, определяется по формуле:

$$G_{др} = g_{др} \cdot F_r / (n\tau),$$

где $g_{др}$ - 100-200 кг/м² - удельный расход дробы на 1 м² сечения газохода;

F_r - площадь сечения газохода шахты в плане, м²;

n - количество пневмолиний (принимается, что одна пневмолиния обслуживает два расбрасывателя, каждый из которых обслуживает сечение по газоходу, равное 2,5 x 2,5 м;

τ - продолжительность периода очистки (обычно 20-60 с).

9.1.2.5. Импульсная очистка

Основана на ударном воздействии волны газов. Устройство для импульсной очистки представляет собой камеру, внутренняя полость которой сообщается с газоходами котла, в которых расположены конвективные поверхности нагрева. В камеру горения периодически подается смесь горючих газов с окислителем, которая воспламеняется

искрой. При взрыве смеси в камере повышается давление и образующиеся волны газов очищают поверхности нагрева от загрязнений.

9.2. Золоулавливание. Защита продуктов сгорания от оксидов серы и азота

9.2.1. Содержание вредных примесей в продуктах сгорания

В продуктах сгорания органического топлива в котельных установках содержатся твердые частицы золы и несгоревшего топлива, оксиды серы (SO_2 , SO_3), азота (NO_x) и ванадия (V_2O_5). При неполном сгорании топлива в дымовых газах содержатся оксиды углерода (CO) и углеводороды типа CH_4 , C_2H_4 и бенз(а)пирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$. Многие из газообразных веществ разрушаются в атмосфере в течение часов и суток. Аэрозольные твердые частицы [сажа, пятиоксид ванадия, бенз(а)пирен] могут накапливаться на поверхности земли и участвуют в приземной циркуляции атмосферы [7-9].

Загрязнение вредными примесями атмосферы, земли и воды ухудшает санитарно-гигиеническое состояние окружающей среды, оказывая вредное действие на организм человека и растительность, ухудшает качество продукции предприятий, увеличивает износ механизмов и разрушает строительные конструкции зданий и сооружений. По степени воздействия на человека вредные вещества разделяются на классы. К чрезвычайно опасным относятся V_2O_5 и бенз(а)пирен. Первое соединение образуется в небольшом количестве при сжигании мазута. Бенз(а)пирен может появляться при сжигании любого топлива при недостатке кислорода, а также выделяться при разложении сажи. Высокоопасными являются NO_2 и SO_3 . Оксиды азота NO_x образуются в зоне высоких температур факела, при $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Выход NO_3 составляет примерно 10 %. SO_3 образуется на конечном этапе горения топлива из SO_2 при избытке кислорода и за счет катализа на отложениях в пароперегревателе. Его выход составляет 2-5 % SO_2 . В зоне низкотемпературных поверхностей нагрева SO_3 преобразуется в пары H_2SO_4 и расходуется в процессе низкотемпературной коррозии.

Степень опасности воздействия вредного вещества на живой организм

определяется отношением его концентрации к предельно допустимой (ПДК), мг/м^3 , в воздухе на уровне дыхания человека: $k_i = C_i/\text{ПДК}$. Значение k_i должно быть меньше 1. При одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ степень опасности оценивают путем сложения токсичных кратностей по формуле:

$$[C_{\text{NO}_2}/\text{ПДК}_{(\text{NO}_2)}] + [C_{\text{NO}}/\text{ПДК}_{(\text{NO})}] + [C_{\text{SO}_2}/\text{ПДК}_{(\text{SO}_2)}] + [C_{\text{CO}}/\text{ПДК}_{(\text{CO})}] < 1.$$

Для выброса твердых частиц:

$$C_{\text{зл}}/\text{ПДК}_{(\text{зл})} + C_{\text{с}}/\text{ПДК}_{(\text{с})} + C_{\text{V}_2\text{O}_3}/\text{ПДК}_{(\text{V}_2\text{O}_3)} < 1,$$

где индексы «зл» и «с» - золовые и сажистые элементы.

Предельно допустимые концентрации (мг/м^3) некоторых веществ в воздухе населенных пунктов, соответственно максимальная разовая и среднесуточная: NO_2 – 0,085 и 0,085; NO – 0,25 и 0,25; SO_3 – 0,30 и 0,10; SO_2 – 0,50 и 0,050; CO – 3,0 и 1,0; $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ - $1 \cdot 10^{-6}$; V_2O_5 – 0,002; сажа – 0,15 и 0,05; пыль (золовые частицы) – 0,50 и 0,15; H_2S – 0,008 и 0,008.

Одной из актуальных современных задач является обеспечение чистоты воздушного бассейна. Для этого необходима очистка продуктов сгорания топлива, удаляемых из котлов после их охлаждения в атмосферу, от вредных веществ. В России установлена обязательная очистка продуктов сгорания от твердых частиц золы и несгоревшего топлива и проводится интенсивная работа по изысканию целесообразных способов очистки газов от оксидов серы и азота.

9.2.2. Золоулавливание

Количество частиц золы и несгоревшего топлива в продуктах сгорания зависит от вида и характеристики топлива, способов пылеприготовления, сжигания и конструкции топки. Часть золы топлива и несгоревших его частиц осаждаются в топке и в газоходах котла. В котлах с топками для слоевого сжигания топлива вместе с продуктами сгорания удаляется до 10-15 % золы топлива. При факельном сжигании пылеугольного топлива и жидком шлакоудалении унос золы продуктами сгорания составляет 30-40, а при топках с сухим шлакоудалением достигает 75-85 %. Гранулометрический

состав уноса показан на рисунок 9.7 - а.

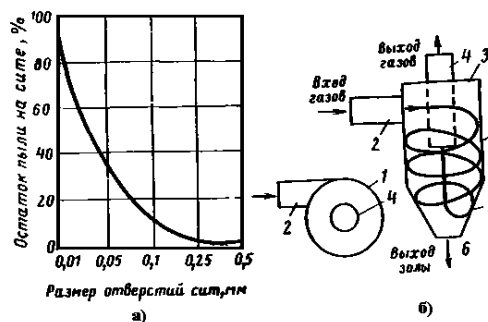


Рисунок 9.7 - Гранулометрический состав уноса при факельном сжигании каменных углей (а) и схема действия циклона (б): 1 – корпус циклона; 2 – входной патрубков; 3 – крышка; 4 – выходной патрубков; 5 – конусная часть корпуса; выход золы

Удельное содержание золы в уходящих газах составляет, например, при работе котла на АШ и сухом шлакоудалении до 20, а при использовании бурых углей — до 40 г/м³, что значительно превышает допустимые концентрации твердых частиц в газах, установленные санитарно-техническими нормами.

В котельных установках для очистки продуктов сгорания от твердых частиц применяют [10-14] следующие устройства:

1) механические инерционные золоуловители, в которых частицы уноса отделяются от газов под влиянием сил инерции при вращательном вихревом движении потока газов,— циклоны различных конструкций, в том числе с омываемыми водой стенками и решетками;

2) электрофильтры, очистка газов в которых основана на ионизации газовой среды и притяжении заряженных частиц уноса к электродам;

3) комбинированные золоуловители, состоящие из последовательно установленных золоуловителей различной конструкции, например циклон и электрофильтр.

Основной характеристикой золоуловителей являются коэффициенты очистки (коэффициенты обеспыливания) газов, общий $\eta_{оч}$ и фракционный $\eta_{оч}^{\phi}$:

$$\eta_{оч} = G_{ул}/G_{вх}; \quad \eta_{оч}^{\phi} = G_{ул}^{\phi}/G_{вх}^{\phi},$$

где $G_{ул}$, $G_{ул}^{\phi}$, $G_{вх}$, $G_{вх}^{\phi}$ - общая масса уловленных частиц уноса, масса данной его фракции, общая масса частиц уноса, входящих в золоуловитель, и масса данной его фракции, входящей в золоуловитель.

Коэффициенты обеспыливания зависят от характеристик уноса и режимов работы котла.

Важными показателями золоуловителей являются добавочный расход электроэнергии на тягу, вызываемый аэродинамическим сопротивлением золоуловителя, удельный расход воды на очистку газов при мокрых золоуловителях, а также стоимость золоуловителя.

Инерционные золоуловители-циклоны применяются различной конструкции. На рисунке 9.7 - б показана схема действия простейшего циклона. Запыленный поток газов подводится в циклон тангенциально, выход газов осуществляется через трубу, расположенную в центре циклона. Под воздействием центробежной силы $F_{ц} = mw_{г}^2/r_{ц}$ твердые частицы отбрасываются к стенкам циклона, теряют скорость и выпадают в бункер. Эффективность обеспыливания в циклоне повышается с увеличением окружной скорости газов $w_{г}$, увеличением массы частицы m и уменьшением радиуса циклона $r_{ц}$.

В простейших циклонах скорость газов, отнесенная к его сечению, принимается примерно равной 3,5, на входе 20-25 и на выходе 12-15 м/с. Аэродинамическое сопротивление циклона $\Delta P_{ц}$ (Па):

$$\Delta P_{ц} = 0,5\xi w_{г}^2 \rho_{г},$$

где $\xi = 10-12$ - суммарный коэффициент сопротивления;

$\rho_{г}$ - плотность газов, кг/м³.

Простейшие циклоны используют в котельных установках малой мощности при слоевом сжигании топлива. Согласно ГОСТ установлена шкала диаметров циклона от 200 до 3000 мм. Цилиндрические циклоны НИИОГаз применяют с диаметром до 2000 мм.

Для повышения эффективности работы инерционного золоуловителя, а также для уменьшения его габаритов применяют батарейные циклоны,

состоящие из большого числа параллельно включенных циклонных элементов малого диаметра. Максимально допустимая запыленность газов при входе в батарейный циклон зависит от диаметра и конструкции элемента. При диаметре элемента 250 мм она составляет 100 г/м^3 при «винтовой» насадке и 75 г/м^3 при насадке в виде «розетки». При диаметре элемента 150 мм - соответственно 50 и 35 г/м^3 . Температура газов в циклоне допустима не более 450°C . Эффективность пылеулавливания в батарейном циклоне в процессе эксплуатации котла и при наличии вторичного уноса отсепарированной пыли из бункера значительно уменьшается при отклонениях скорости газов от расчетной. Потеря давления в батарейном циклоне при обычно принятых скоростях газа 3,5-4,75 м/с и номинальной нагрузке составляет 500-700 Па. При очистке газов в котлах со слоевыми топками $\eta_{\text{оч}} = 80-90 \%$, а при пылеугольном сжигании топлива $\eta_{\text{оч}} = 65-70 \%$.

Батарейные циклоны применяют в котельных установках с производительностью до 320 т/ч. Промышленностью России выпускаются батарейные циклоны типа БЦ, состоящие из одной, двух, четырех и шести секций с числом элементов от 25 до 792 шт. Число элементов n циклона может быть приближенно определено по формуле:

$$n = 0,91(V/d^2)[\xi\rho_r/\Delta p]^{0,5},$$

где V - объем газов в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;

d - диаметр элемента, м;

ξ - общий коэффициент сопротивления, для элемента $d = 250$ мм с винтовым направляющим аппаратом $\xi = 85$;

Δp - сопротивление элемента циклона, Па;

ρ_r - плотность газа, кг/м^3 .

С целью повышения коэффициента улавливания пыли применяют мокрые циклонные золоуловители, в которых орошаются водой стенки циклона и поток газов. Например, в центробежных скрубберах-золоуловителях типа ЦС-ВТИ водой орошаются стенки циклона. Такие золоуловители изготавливают диаметром от 0,6-1,7 м и производительностью

1-11 м³/с. Расход воды на орошение стенок составляет 0,2-0,9, на промывку бункера 0,85 кг/с. Перепад давлений в золоуловителе 0,65-0,8 кПа.

В мокروطковом золоуловителе типа МП-ВТИ на входе газов в золоуловитель имеется прутковая орошаемая водой решетка. Золоуловители применяют диаметром от 2300 до 3300 мм, производительностью от 18 до 38,2 м³/с. Расход воды составляет 2,9-4,1 кг/с, перепад давлений 650-800 Па. В усовершенствованных золоуловителях вместо трубной решетки применены трубы Вентури, служащие для коагуляции частиц золы. Степень очистки в мокروطковом золоуловителе достигает $\eta_{оч} = 92 \%$. Мокрые золоуловители могут использоваться при содержании серы в топливе менее 0,3 % на 1 МДж/кг и содержании свободной щелочи в золе менее 12 %. Жесткость воды, подаваемой на орошение, должна быть не выше 15 мг-экв/кг. Основным преимуществом мокрых золоуловителей является исключение вторичного уноса уловленной пыли, что повышает их КПД. Мокрые золоуловители в эксплуатации сложнее и менее надежны, чем батарейные циклоны, и их применение ограничивается предельным содержанием серы в топливе и щелочностью золы. Помимо этого при применении таких золоуловителей необходима очистка загрязненной воды.

В процессе очистки газов в мокрых золоуловителях происходят их насыщение парами воды, увеличение объема и частичное охлаждение. Влагосодержание газов при полном их насыщении водяными парами в золоуловителе d_n (г/м³) определяется по формуле:

$$d_n = 804 p_n / \rho_r(p - p_n),$$

где ρ_r - плотность продуктов сгорания при 0°С;

p_n - парциальное давление водяного пара в газе при полном его насыщении, Па;

p - полное давление влажного газа, Па.

Относительное увеличение объема продуктов сгорания в золоуловителе ΔV_r составляет:

$$\Delta V_r = 100 V'_r [(d_n - d_r)/804] / V'_r,$$

где V'_r - объем продуктов сгорания до золоуловителя, $\text{м}^3/\text{кг}$;

d_n и d_r - влагосодержание газов после и до золоуловителя, $\text{г}/\text{м}^3$.

Температура продуктов сгорания после золоуловителя может быть определена из уравнения теплового баланса продуктов сгорания до и после золоуловителя:

$$V'_r C'_r t'_r = V'_r C''_r t''_r + [(d_n - d_r)/804] \cdot r + g t''_r,$$

где V'_r - объем продуктов сгорания до золоуловителя, $\text{м}^3/\text{кг}$;

C'_r и C''_r - теплоемкости продуктов сгорания до золоуловителя и после него, $\text{кДж}/\text{м} \cdot \text{К}$;

t'_r , t''_r - температуры продуктов сгорания до золоуловителя и после него, $^\circ\text{С}$;

r - теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$;

g - удельный расход воды в золоуловителе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Очистка газов в рукавных фильтрах происходит за счет фильтрации газов через ткань и электростатического взаимодействия между частицами уноса и тканью. Газы подаются снаружи рукавов фильтра, проходят через поры ткани и удаляются из внутренней полости рукавов очищенными от уноса. Частицы уноса, осажденные на поверхности ткани, периодически удаляются в золовой бункер путем продувки рукавов сжатым воздухом.

Скорость фильтрации газов составляет 2-3,5 м/мин. Необходимая площадь поверхности ткани рукавов 50-70 м^2 на 1 м^3 газов. Тканевые фильтры применяют за рубежом для очистки газов от котлов, работающих на угле производительностью до 90 т/ч.

Очистка газов в электрофильтрах основана на том, что вследствие коронного разряда между двумя электродами, к которым подведен пульсирующий электрический ток высокого напряжения до 60 кВ, проходящий через электрофильтр поток газов заполняется отрицательными ионами, которые под действием сил электрического поля движутся от коронирующего к осадительному электроду. При этом находящиеся в газе частицы адсорбируются и увлекаются к осадительным электродам. Отдав заряд, частица падает в карман, а затем в золовой бункер. Накапливающийся

на осадительных электродах унос периодически стряхивается специальными устройствами в бункере, из которых затем удаляется. Коронирующие электроды выполняют в виде металлических стержней, ленточно-игольчатыми или в виде стержней штыкового сечения. Осадительные электроды делают из труб или пластин. Применяют электрофильтры с горизонтальным и вертикальным потоком газов. Для котельных установок преимущественно используют горизонтальные электрофильтры с пластинчатыми электродами. В зависимости от числа последовательно расположенных электродов различают одно-, двух- и четырехпольные электрофильтры.

Схема конструкции горизонтального двухпольного электрофильтра показана на рисунке 9.8.

Оптимальная скорость газов в электрофильтре 1,5-1,7 м/с. При этом аэродинамическое сопротивление электрофильтра составляет 200-300 Па. Расход электроэнергии на очистку газов составляет 0,1-0,15 кВт-ч на 1000 м³ газа. Температура газов перед электрофильтром должна быть не более 200 °С. Степень очистки газов в электрофильтре зависит от скорости газов, длины электродов и расстояния между ними, а также характеристик пыли.

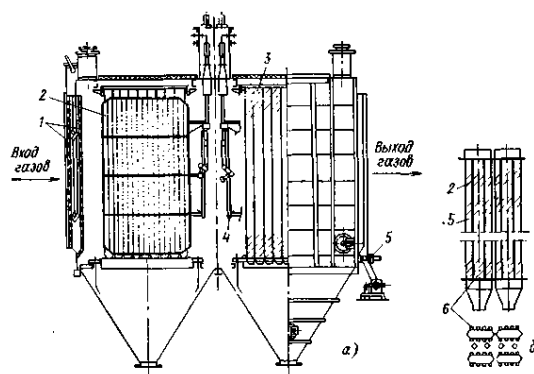


Рисунок 9.8 - Горизонтальный пластинчатый двухпольный электрофильтр: а – общий вид; б – элементы электрофильтра; 1 – газораспределительная решетка; 2 – коронирующие электроды; 3 – осадительные электроды; 4 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 5 – механизм встряхивания осадительных электродов; 6 – карманы осадительных электродов

В применяемых конструкциях электрофильтров улавливается большая часть пыли с размерами частиц более 10 мкм; коэффициент очистки $\eta_{оч} = 96-97 \%$.

Комбинированный золоуловитель обычно состоит из батарейного циклона в качестве первой ступени очистки и электрофильтра с горизонтальным или вертикальным ходом газов, объединенных в один агрегат. В батарейном циклоне происходит улавливание крупных частиц уноса, что улучшает работу электрофильтра. Коэффициент очистки в комбинированных золоуловителях достигает $\eta_{оч} = 98 \%$.

На основе сравнительного анализа существующих золоуловителей циклоны НИИОГаз и батарейные циклоны преимущественно применяют в котлах малой и средней мощности - до 160 т/ч при слоевом и факельном сжигании топлива. Мокропрутковые золоуловители используют при небольшом содержании серы в топливе и повышенных требованиях к очистке газов. Наиболее сложные и дорогие золоуловители - электрофильтры и комбинированные золоуловители - батарейные циклоны с электрофильтрами применяют в котельных установках большой мощности при высоких требованиях к очистке продуктов сгорания, удаляемых в атмосферу.

9.2.3. Очистка продуктов сгорания от оксидов серы

В продуктах сгорания, удаляемых в атмосферу из котлов, работающих на топливах, содержащих органическую и колчеданную серу, имеются оксиды серы. В основном они находятся в виде SO_2 и в небольшом количестве, до 1-2 %, в виде SO_3 .

Количество оксидов серы в газах M_{SO_2} (кг/ч) определяется по формуле $M_{SO_2} = (B_p \cdot S_{o+k}^p + km_{SO_2})/10^2 m_s$,

где B_p - расчетный расход топлива, кг/ч; S_{o+k}^p - содержание горючей серы в рабочей массе топлива, %; m_{SO_2} и m_s - молекулярные массы сернистого ангидрида и серы.

Содержание SO_2 в продуктах сгорания топлива относительно мало. Например, для мазута при содержании в нем серы $S_{\text{o+k}} = 5\%$ оно составляет примерно $0,3\%$. Относительно малая концентрация оксидов серы в продуктах сгорания значительно затрудняет решение вопроса их очистки. Система очистки газов от оксидов серы должна обеспечивать достаточно полное их удаление из газов, возможность использования получаемых в процессе сероочистки конечных продуктов и существенно не удорожать себестоимость вырабатываемого пара. Возможно применение следующих методов очистки газов от SO_2 и SO_3 :

- 1) абсорбция жидкими растворами различных веществ;
- 2) адсорбция с применением в качестве адсорбента твердого вещества;
- 3) поглощение SO_2 и SO_3 различными веществами с образованием при этом других соединений.

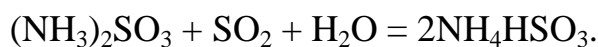
Указанные методы очистки обычно комбинируют. Например, адсорбция и абсорбция часто сопровождаются переводом сорбированного газа в другое соединение. При некоторых методах очистки регенерация поглощенного SO_2 не производится, например при известковом способе очистки, при котором образовавшийся в результате реакции поглощения SO_2 сернокислый кальций CaSO_4 является конечным продуктом очистки. Различают методы мокрой и сухой очистки газов.

Известны две группы методов мокрой очистки. Первая основана на осуществлении процессов, при которых сначала происходит удаление SO_2 за счет его физического растворения в различных поглотителях, затем поглощенный SO_2 выделяется из растворителя путем его нагрева или отгоняется под вакуумом, а растворитель может быть снова использован для очистки. Наиболее удобным и дешевым поглотителем является вода, однако она малоэффективна при низких концентрациях SO_2 , и поэтому приходится применять более эффективные и дорогие поглотители. В поглотительных растворах используются различные соединения щелочноземельных металлов (ксилетин, высшие спирты и др.).

Во второй группе методов мокрой очистки, более распространенной, в качестве поглотителя применяют водные растворы или взвеси веществ, переводящие оксиды серы в сульфиты и сульфаты. При этом одним из наиболее эффективных абсорбентов оказался аммиак. В такой сероулавливающей установке аммиак вступает во взаимодействие с сернистым ангидридом с образованием сульфита аммония:



а сульфит аммония затем поглощает SO_2 с образованием при этом бисульфита аммония:



Образовавшийся раствор бисульфита аммония может быть затем переработан в товарную продукцию.

В технологических схемах метода мокрой очистки продуктов сгорания для удаления SO_2 из газов используется щелочная вода, в которую добавляется дополнительно небольшое количество щелочи в виде водной взвеси мела. Продукты сгорания поступают в абсорбер при температуре 120 °С. Вода с добавкой щелочи орошает насадку абсорбера и стекает противоточно по отношению к движущемуся вверх потоку газов. Из абсорбера вода подается в отстойник. Перед отстойником в воду добавляется раствор сернокислого марганца или гидроксида железа и марганца, которые являются катализаторами в процессе окисления SO_2 с образованием сульфата кальция. Окисление SO_2 непосредственно в абсорбере нежелательно, так как приводит к уменьшению растворяющей способности воды.

Процесс окисления производится в аэраторе, куда подается воздух. Шлам из отстойника задерживается в фильтре, а сбросная вода добавляется к основному потоку воды, направляемому в отстойник. Товарных продуктов при этом методе очистки газа не получается.

Существенными недостатками всех мокрых методов очистки являются насыщение очищенных газов водяными парами и снижение их температуры, в результате чего потоки газа опускаются вблизи места их выброса, где

концентрация SO_2 может стать больше, чем при выбросе неочищенного газа.

Для осуществления таких систем требуется громоздкая и сложная аппаратура, выполняемая из нержавеющей стали. В настоящее время основные работы по очистке газов ведутся в области разработки и совершенствования методов сухой очистки.

Методы сухой очистки основаны на способности неорганических солей металлов, в основном оксидов и карбонатов, при высокой температуре адсорбировать оксиды серы с образованием сульфитов и сульфатов этих металлов. В присутствии кислорода окисление происходит практически до образования сульфатов. Адсорбентами могут быть оксиды алюминия, марганца, железа, калия, натрия и др.

9.2.3.1 Адсорбционный метод улавливания

В качестве адсорбента при повышенной температуре может быть использован активированный уголь. Сорбирующая способность угля снижается по мере его работы. Восстановление ее возможно обработкой угля при температуре примерно $600^{\circ}C$. Сорбированный активированным углем SO_2 частично окисляется до SO_3 и при наличии водяного пара образует серную кислоту. Установка должна выполняться из кислотоупорного материала, что требует больших затрат на ее сооружение.

В качестве адсорбента также применяют полукокс твердого топлива, очищенного от серы. В газах, покидающих десорбер, содержание CO_2 составляет 10-15 % начального. Подобные установки подвергаются сильной коррозии в области температур ниже температуры точки росы.

Описанные и другие предложенные методы мокрой и сухой очистки продуктов сгорания топлива от оксидов серы, удаляемых в атмосферу из котлов, не получили еще широкого промышленного применения вследствие больших капитальных затрат, необходимых для их сооружения, а также значительных расходов на эксплуатацию.

В настоящее время основными мероприятиями для предотвращения загрязнения атмосферы оксидами серы являются методы очистки газа

непосредственно в процессе сжигания топлива, а также уменьшения концентрации SO_2 и SO_3 в приземном слое воздуха путем рассеивания продуктов сгорания за счет удаления их в атмосферу высокими трубами.

9.2.4. Очистка продуктов сгорания от оксидов азота

В процессе сжигания топлива образуются оксиды азота [15-17]. Реакция образования оксидов азота имеет цепной механизм и протекает с поглощением теплоты, например: $\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{NO} - 90 \text{ кДж/моль}$. Уменьшение температуры горения резко снижает равновесную концентрацию оксида азота и одновременно увеличивает время, необходимое для достижения этой концентрации. В котлах при температурах в топке 1400-1500 °С время пребывания газов в факеле в 100 раз меньше необходимого для достижения равновесной концентрации, и концентрация образующегося оксида азота составляет $\text{NO} = (0,05-0,15)p_{\text{NO}}$, где p_{NO} - парциальное давление оксида азота. Избыток воздуха ускоряет реакцию, но одновременно его увеличение снижает температуру горения, что замедляет реакцию. При малых избытках воздуха более существенно влияние первого фактора, при больших - второго. Влияет на сохранение оксида азота скорость охлаждения газов (скорость закалки). Вследствие обратимости реакции оксиды азота в газах сохраняются при быстром их охлаждении. Например, при $\alpha = 1,3$ для сохранения NO в количестве 0,6 скорость закалки составляет примерно 6 К/с.

Охлажденный оксид азота вступает в реакцию с атмосферным кислородом, в результате чего образуется NO_2 . Реакция зависит от концентрации реагентов и с уменьшением NO замедляется, при этом в атмосферном воздухе сохраняется NO. При дальнейшем охлаждении (ниже 140 °С) часть NO_2 переходит в N_2O_4 , доля которой увеличивается по мере охлаждения. При некоторых условиях образуется N_2O . Таким образом, в атмосферном воздухе могут образовываться и существовать одновременно различные оксиды азота при преобладающем содержании NO_2 и N_2O_4 . Содержание оксидов азота в продуктах сгорания, уходящих из котлов, изменяется в широких пределах (в пересчете на NO от 0,015 до 0,15 %) и

зависит от мощности котла, характеристики топлива и организации процесса горения.

Зависимости содержания оксидов азота NO_x (мг/м^3) и $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ (мкг/100 м^3) от коэффициента избытка воздуха описываются уравнениями: $\text{NO}_x = 763\alpha_T^{3.35}$ и $\text{C}_{20}\text{H}_{12} = 9,2\alpha_T^{-3.68}$, т.е. увеличение коэффициента избытка воздуха в топке повышает выход оксидов азота и снижает образование бензаперена.

В котельных установках очистка продуктов сгорания от оксидов азота пока практически не применяется. Наиболее реальным путем снижения содержания оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания, удаляемых в атмосферу, является снижение температуры горения и коэффициента избытка воздуха в области ядра факела в топке.

Сокращение выбросов в атмосферу оксидов азота дымовыми газами принципиально может быть осуществлено по следующим основным направлениям:

1) применение технологии сжигания топлива, предотвращающей значительное окисление азота воздуха и топлива, в частности использование для горения в качестве окислителя кислорода;

2) применение жидких или твердых сорбентов, поглощающих из дымовых газов с последующей регенерацией и получением товарных форм связанного азота;

3) каталитическое разложение оксида азота на элементарный азот и кислород.

Второе и третье направления используются при производстве азотной кислоты и характеризуются большими капитальными и эксплуатационными затратами. Щелочая абсорбция включает химическое связывание азота по реакциям типа:



При этом поглощению азота должно предшествовать окисление NO до NO_2 , что при концентрациях $\text{N} < 0,05 \%$ требует огромных объемов абсорбционных колонн. Принципиальная технологическая схема

каталитически-абсорбционной очистки дымовых газов от монооксида азота показана на рисунке 9.9.

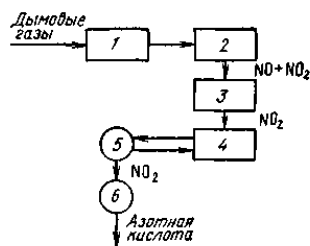


Рисунок 9.9 - Схема адсорбционной очистки газов от оксидов азота: 1 – охлаждение газов; 2 – сушка газов; 3- каталитическое окисление NO и NO₂ в кипящем слое;

4 – подача сорбента; 5 – десорбция NO₂; 6 – производство азотной кислоты

Внедрение адсорбционных методов очистки дымовых газов сопряжено с большими трудностями. При температурах уходящих газов из котлов катастрофически падают поглощательные емкости сорбентов. Малые парциальные давления NO_x требуют огромных реакторных емкостей. Сложной задачей является также регенерация реагента, так как выделяющийся NO₂ должен иметь высокую концентрацию, иначе возникает проблема очистки используемого для регенерации сорбента воздуха.

Практически уменьшения выбросов оксидов азота в атмосферу котлами наиболее реально в настоящее время достичь путем применения рациональной технологии сжигания топлива.

Авторами данного пособия исследовалась возможность обеззараживания дымовых газов котельных установок с помощью озонированного воздуха [18], со снижением концентрации продуктов неполного сгорания, бенз(а)перена, диоксина и оксидов азота.

Список литературы

1. Вдовенко М.И. Минеральная часть энергетических углей: Физико-химическое исследование. Алма-Ата: Наука, 1973. 256 с.
2. Залкинд И.Я, Вдовченко В.С., Дик Э.П. Зола и шлаки в котельных

топках. М.: Энегоатомиздат, 1988. 79 с.

3. Морозов А.П., Трубицына Г.Н. Технология конструкционных материалов и теплофизика. Поризованные теплоизоляционные материалы: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 204 с.

4. Чеканов Г.С., Зорин В.А. Образование и устранение отложений в системах гидрозолоудаления. М.: Энергоатомиздат, 1981. 175 с.

5. Гаврилов Е.И. Топливо-транспортное хозяйство и золошлакоудаление на ТЭС: учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1987. 167 с.

6. Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнения и очистка поверхностей нагрева котельных установок. М.: Энергия, 1980. 328 с.

7. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1992. 176 с.

8. Энергоэкологические проблемы сжигания твердого топлива в котельных установках / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов и др.; под ред. Е.В. Торопова. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1995. 191 с.

9. Повышение экологической безопасности ТЭС: учеб. пособие / А.И. Абрамов, Д.П. Елизаря, А.Н. Ремизов и др.; под ред. А.С. Седлова. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 377 с.

10. Семиков Ф.П., Ужек Г.Л. Очистка дымовых газов золоуловителями. Киев: Техника, 1975. 167 с.

11. Маслов В.Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. М.: Энергия, 1977. 207 с.

12. Потапов О.П., Кропп Л.Д. Батарейные циклоны: Пыле- и золоуловители. М.: Энергия, 1977. 150 с.

13. Кропп Л.И., Акбрут А.И. Золоуловители с трубами Вентури на тепловых электростанциях. М.: Энергия, 1977. 159 с.

14. Кропп Л.И., Харьковский М.С. Мокрое золоулавливание в условиях оборотного водоснабжения. М.: Энергия, 1980. 111 с.

15. Найденов Г.Ф. Горелочные устройства и защита атмосферы от оксидов азота. Киев: Техника, 1979. 97 с.

16. Шницер И.Н., Литовкин В.В. Образование и снижение содержания оксидов азота в пылеугольных котлах. Киев: Техника, 1986. 109 с.

17. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 141 с.

18. Энергетика и защита окружающей среды. Свойства и применение озона: учеб. пособие / Морозов А.П., Коптев А.П., Семкин И.Г., Марченко А.В. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 175 с.