Выводы

 Метод Фурье-преобразования позволяет оперативно выявлять в корпусе печи с толстым металлическим кожухом сколы обмазки, выпадение кирпичей футеровки, образование настылей и другие опасные дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Двухуровневая система термографического контроля промышленных теплоустановок // Оптические, радиоволновые, тепловые методы и средства контроля природной среды, материалов и промышленных изделий: В сб. трудов VII Междунар. научно-техн. конф. – Череповец, Россия. – 16–18 сентября 1997. – Череповец, 1997. – С. 45–46.
- Торгунаков В.Г., Суханов М.С., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Идентификация дефектов внутренней поверхности цементной печи // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 5. – С. 179–184.
- Гнедина И.А., Соколинская Г.А. Определение толщины обмазки в зоне спекания вращающихся печей // Цемент и его применение. – 1979. – № 2. – С. 15–16.

- Для ранней диагностики образующихся дефектов внутренней поверхности печи метод Фурьепреобразования следует использовать в сочетании с решением обратной задачи теплопроводности.
- Вавилов В.П., Ширяев В.В. Способ определения поперечных размеров внутренних дефектов при тепловом методе контроля // Дефектоскопия. – 1979. – № 11. – С. 101–103.
- Суханов М.С., Торгунаков В.Г. Имитационная модель тепловых процессов цементной печи // Цемент и его применение. – 1999. – № 5. – С. 37–41.
- Torgunakov V.G., Sukhanov M.S., Vavilov V.P. Identifying hidden defects in thermal insulation of revolving kilns by IR thermography // Proc. SPIE «Thermosense-XXIX». – V. 6541. – Orlando, Florida, USA, 2007. – P. 131–143.
- Лайонс Р.Л. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. М.: Бином, 2007. – 652 с.

Поступила 09.10.2009 г.

УДК 662.612.321

ЗОЛОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ НЕМОЛОТОГО УГЛЯ

Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет E-mail: bl2596@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования процессов преобразования минеральной части бурого угля в котле и возникновения натрубных золовых отложений при безмельничной технологии сжигания. Показаны количественные и качественные особенности формирования химического состава отложений на конвективных поверхностях нагрева.

Ключевые слова:

Плотные отложения на трубах, сульфатизация, безмельничное сжигание, химический состав, энергетический котел. *Кеу words:*

Dense adjournment on pipes, sulphatization, anmillered burning, chemical composition, power boiler.

Введение

Возможность создания малогабаритного универсального парогенератора, работающего без ограничений по шлакованию при сжигании всей гаммы углей Канско-Ачинского бассейна, всегда была привлекательна для конструкторов, несмотря на очевидную необходимость поиска нетривиальных решений по организации топочных процессов. Одним из активно обсуждаемых подходов к осуществлению такого проекта является низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания твердого топлива [1]. В связи с этим исследования свойств минеральных продуктов сжигания и их проявлений относительно поверхностей нагрева котлов с НТВ-топками имеют большое значение для развития котельно-топочной техники нового поколения. Особенно уникальными они являются применительно к головному образцу котла БКЗ-420-140-9, который был единственным в практике котлостроения агрегатом, спроектированным и изготовленным в заводских условиях специально для безмельничного сжигания бурого угля, и рассматривался как альтернатива традиционной пылеугольной технологии.

Объект исследования

Исследования образования отложений на трубах поверхностей нагрева выполнены в натурных условиях действующего котла (рис. 1) в ходе несения эксплуатационной нагрузки при сжигании рядового угля Ирша-Бородинского месторождения. Топочная камера – 1 котла в газоплотном исполнении экранирована трубами 60 мм и имеет размеры в плане 14460×7700 мм. На фронтовой стене в один ряд расположены 8 прямоточных горелок – 2 с углом наклона канала первичного воздуха вниз на 45°, а канала вторичного воздуха – на 60°. В устье холодной воронки с тыльной стороны по всей ширине топки предусмотрено нижнее дутье – 3 лентой с направлением вдоль фронтового ската холодной воронки. Еще одной особенностью этой топки является наличие газоотбойных козырьков: надгорелочного – 5, выполненного из труб фронтового экрана, и верхнего, образованного задней плоскостью горизонтального радиационного пароперегревателя – 6, который вместе с нижней плоскостью аэродинамического выступа и частью заднего экрана создают своеобразный газовый «карман». У заднего экрана параллельно боковым стенам с равномерным шагом располагаются 10 ширм – 7, разделяющих вертикально внутритопочное пространство от холодной воронки до аэродинамического выступа. Пароперегреватель включает в себя две радиационные ступени - 6, 7, расположенные в топке, две ступени ширм – 8, 9 на выходе из нее и три конвективных ступени – 10 в горизонтальном газоходе. В конвективной шахте расположены двухступенчатые экономайзер – 12, 14 и воздухоподогреватель – 13, 15.



Рис. 1. Схема компоновки котла БКЗ-420-140-9: 1) топочная камера; 2) горелки; 3) сопла нижнего дутья; 4) сопла третичного дутья; 5) газоотбойный элемент; 6) горизонтальный радиационный пароперегреватель; 7) испарительные двусветные панели и вертикальный радиационный пароперегреватель; 8, 9) ступени ширмового пароперегревателя; 10) ступени конвективного пароперегревателя; 11) фестон; 12, 14) ступени водяного экономайзера; 13, 15) ступени воздухонагревателя; 16) места отбора проб отложений

Соединение горизонтального газохода и конвективной шахты выполнено в виде оригинальной конструкции фестонированного пучка — 11 из четырех рядов труб, которые являются таким образом последними на пути запыленного потока продуктов сгорания в горизонтальном газоходе. Первый и третий ряды отводят пароводяную смесь из экранов, образующих верхнюю плоскость аэродинамического выступа, а второй и четвертый являются продолжением фронтового экрана конвективной шахты.

Трубы фестонированного пучка и первые ряды второй ступени водяного экономайзера являются местом образования плотных отложений – 16. Для отбора их образцов на рядах – 1 и 3 фестона на лобовой стороне труб № 31 и 32 слева, а также на ряде – 1 экономайзера подготовлены контрольные участки. В течение двухлетнего наблюдения за контрольными участками выполнены два отбора проб с интервалами 284 и 394 суток соответственно, что позволило оценить основные тенденции трансформации отложений во времени.

Для выявления особенностей формирования состава натрубных отложений они сравнивались с исходным материалом — золой, транспортируемой дымовыми газами. Материалом для сравнения служили пробы уноса золы, отбираемые в течение всего периода исследования из-под золоуловителей.

Формирование уносимой из топки золы

Фракционный и вещественный состав золы, уносимой дымовыми газами в конвективные газоходы котла, зависит от характера распределения минеральной составляющей в угле и от особенностей организации технологии сжигания в топочной камере [2]. Для исследованного котла с НТВ-топкой такими особенностями являются: подача угля в горелки в виде дробленки (а не в пылевидном состоянии) и вихревая аэродинамическая структура низкотемпературного факела. Эксперименты по зондированию различных зон топочного объема позволили установить своеобразие распределения в нем минеральной части угля, присущее безмельничной технологии реализации НТВ способа сжигания бурого угля [3]. Выделены траектории с наибольшей концентрацией частиц в пристенных областях вихревых зон и траектории с уменьшенной концентрацией частиц, находящиеся ближе к центральным областям.

Вещественный состав отражает накопление породных частиц в нижней вихревой зоне и последующее перемещение их в верхнюю часть топки по мере измельчения. Обратная картина наблюдается с компонентами внутренней зольности угля: по высоте топки их содержание постепенно увеличивается. Другая особенность минерального балласта факела состоит в обогащении пристенной области оксидами кремния и железа, носителями которых при данном способе сжигания выступают наиболее крупные и тяжелые фракции. В противоположность этому мелкие и легкие частицы, содержащие в основном компоненты внутренней зольности, в вихревых зонах меньше смещаются к периферии под действием центробежных сил и проходят через центральную часть топки по укороченной траектории, что приводит к повышению концентрации оксида кальция.

Установленные особенности минерального балласта факела не могут не сказаться на специфике химического состава фракций уносимой из топки золы. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 2, где показано распределение преобладающих химических макрокомпонентов по группам размерных фракций.

С увеличением крупности частиц для СаО наблюдается практически непрерывное уменьшение содержания от 26 до 5 %. Поскольку в исходном угле оксид кальция главным образом находится в химически связанном виде с угольным веществом, крупные фракции зольного уноса (δ >500 мкм) почти полностью состоят из частиц внешней зольности (породных включений), а в мелких фракциях (δ <60 мкм) сосредотачиваются компоненты внутренней составляющей золы. Поэтому и содержание Al₂O₃, одного из компонентов внешней зольности, возрастает вдвое по мере увеличения размеров частиц – от 11 % (*б*<46 мкм) до 22 % (*б*>500 мкм). Изменение содержания SiO₂ как главного компонента внешней зольности в канско-ачинских углях показывает, что породные включения угля не переходят в разряд мелких фракций (δ =46...60 мкм), а сосредотачиваются в крупных фракциях уноса (*б*≥100 мкм).

Установленные закономерности составляют принципиальные отличия формирования уноси-

мой из НТВ-топки золы при безмельничной технологии по сравнению со сжиганием угольной пыли. Они объясняются тем, что в котлах, оснащенных пылесистемами, при сжигании канско-ачинских углей происходит насыщение мелких фракций уноса SiO₂ за счет переизмельчения минеральной части в мельницах и выноса мелких частиц из топки восходящим потоком. В котле с НТВ-топкой при безмельничном сжигании унос золы формируется иначе: с одной стороны, породные включения попадают в топку более крупными, а, с другой стороны, значительные скорости в вихревых зонах ослабляют действие гравитационных факторов сепарации, что приводит к повышению однородности золового уноса как по размерам, так и по химическому составу.

Характеристика и механизм образования отложений

Образующиеся на контрольных участках плотные отложения прочно связаны со стенкой трубы и представляют собой гребни с правильными ровными гранями, направленные вершиной навстречу газовому потоку. Высота единичного гребня составляет от 6 до 20 мм, а угол при вершине находится в пределах 70...85°. Химический состав отложений (табл.) позволяет выделить общие закономерности их формирования, а также влияние таких факторов как температура дымовых газов (уменьшение температуры в последовательности проб № 5, № 1–4, № 6–8), время пребывания на контрольном участке (увеличение в последовательности проб – № 6, № 8 – для водяного экономайзера и № 1–4 – для фестона).



Рис. 2. Распределение макрокомпонентов химического состава по фракциям уноса золы

N⁰N⁰		Содержание на бессульфат-					SO₃,	
про-	Место отбора	ную массу, мас. %					мас.	K _{SO3}
бы		SiO ₂	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	%	
1	3 ряд фестона	12,41	12,56	7,14	57,64	10,25	29,75	0,43
2		13,19	12,59	7,89	54,79	11,56	34,84	0,57
3		13,97	13,44	9,33	54,70	8,54	33,23	0,55
4		15,55	13,03	7,90	53,94	9,57	35,23	0,63
5	1 ряд фестона	13,62	13,36	10,07	55,92	7,00	38,21	0,71
6	1 ряд водяного экономайзера	8,87	13,91	6,34	61,12	10,51	40,08	0,65
7		9,09	16,92	8,40	48,34	17,35	35,69	0,56
8		16,40	11,53	11,75	53,59	6,71	36,14	0,67
9	Внутренний слой пробы 2	19,50	9,30	11,60	50,50	9,30	24,00	0,40
10	Поверхностный слой пробы 2	7,60	10,60	11,70	55,90	14,80	41,80	0,72

Таблица. Химический состав плотных отложений

Золовые отложения (табл.) существенно отличаются по составу от летучей золы, в частности, от наиболее тонкой фракции уноса (рис. 2), которая, согласно утвердившимся преставлениям [4], формирует первоначальную структуру натрубных отложений. Эти отличия свидетельствуют о физико-химических процессах при развитии отложений. В первую очередь обращает на себя внимание значительное увеличение содержания SO_3 в отложения: 30...40 % по сравнению с 0,2...0,6 % в тонкой фракции уноса, т. е. в 50...200 раз. Одновременно увеличивается содержание оксидов кальция (в 1,8...2,3 раза), магния (в 1,4...2,1 раза), железа (в 2,3...3,4 раза) и уменьшается содержание оксида кремния (в 3...5 раз).

Эти изменения указывают на роль в упрочнении слоя отложений процессов сульфатизации ос-

новных компонентов золы при омывании труб дымовыми газами наряду с сопутствующими процессами спекания частиц на основе соединений железа [4]. Поскольку содержание K₂O и Na₂O в иршабородинском угле невелико, то количество компонентов, способных сульфатизироваться, определяется главным образом содержанием CaO и MgO. Рентгенография проб отложений подтверждает, что основным связывающим веществом является сульфат кальция CaSO₄. Количество остальных компонентов мало отличается от содержания их в тонкой фракции летучей золы.

Степень сульфатизации, в отличие от обычно используемого подхода [5], оценивалась с учетом специфики состава золы сжигаемого угля по упрощенной формуле:

$$K_{\rm SO_3} = \frac{\rm SO_3}{1,428\,\rm CaO + 1,986\,\rm MgO}$$

где SO₃, CaO и MgO – содержание оксидных форм в пробе по данным химического анализа, мас. %.

Общая масса отложений характеризуется диапазоном K_{so_3} от 0,4 до 0,7 (табл.), наиболее высокая степень сульфатизации соответствует наибольшей продолжительности пребывания пробы в потоке газов (пробы № 4 и 5 на трубах фестона, проба № 8 на трубах водяного экономайзера) и оптимальным температурным условиям (проба № 5).

Данные, приведенные в таблице, показывают, что доминирующим фактором для упрочнения отложений за счет сульфатизации является общая продолжительность воздействия на них газозолового потока. Эта закономерность проявляется в ви-



Рис. 3. Зависимость степени сульфатизации плотного отложения от его высоты (цифрами обозначены номера проб)

де линейной зависимости на рис. 3. При этом она связана обратным образом с высотой отложения, что свидетельствует о наличии противоположных тенденций воздействия газозолового потока на формирование плотных отложений.

Более детальное представление о формировании отложений дает изучение послойной структуры.

В каждом из отобранных образцов отложений имеются несколько слоев: поверхностный, группа срединных и внутренний. Внутренний слой, непосредственно прилегающий к трубе, имеет красновато-коричневый цвет с вишневыми вкраплениями. Толшина этого слоя изменяется в пределах 1...1,5 мм по краям и 3...4 мм в середине. Поверхностный слой представляет собой коричневую или темно-коричневую оболочку толщиной 1...1,5 мм, закрывающую снаружи гребень отложения. На нем видны многочисленные следы износа летучей золой в виде бороздок глубиной до 1 мм. На 1 см длины образца отложений приходится до 40-50 борозд, оставленных абразивными частицами. Группа срединных слоев, количество которых зависит от высоты гребня, занимает основную часть плотного отложения. Каждый слой имеет толщину 1...2 мм, более мощную в средней части гребня, чем по краям. Цвет изменяется от землянисто-серого до оранжевого.

Химический состав выделенных слоев в сравнении с тонкой фракцией золового уноса приведен на рис. 4 на примере образца № 2.

При движении газозолового потока процесс взаимодействия частичек летучей золы и лобовой части трубы рассматривается как результат оседания нейтральных и активных (связывающих) частиц золы, причем масса осаждающейся на трубу золы является линейной функцией от скорости набегающего потока и концентрации твердых частиц в нем, а разрушение отложений (износ) зависит от скорости в третьей степени. При относительно низких скоростях потока происходит интенсивное осаждение нейтральной части золы, и отложения являются рыхлыми. По мере увеличения скорости потока эрозионное воздействие усиливается до такой степени, что на лобовой части трубы могут закрепиться только активные частицы, вступающие в химические реакции с газообразными продуктами сжигания угольной пыли (например, SO₂), образуя растущие навстречу потоку плотные сульфатносвязанные отложения. При достижении скорости потока, когда разрушающее действие золы становится превалирующим, на трубе не образуется отложений, и начинается износ металла трубы.

Механизм образования плотных отложений на конвективных поверхностях при низкотемпературном вихревом сжигании дробленого угля предполагает образование на трубе первичного слоя, состав которого зависит от температуры газозолового потока, химического состава летучей золы и аэродинамических условий в зоне трубного пучка. При формировании внутреннего слоя наблюдается рост концентрации минеральных компонентов, способных сульфатизироваться, таких как CaO и MgO, и уменьшается содержание SiO₂, нейтрального в диапазоне температур 970...1070 К. Внутренний слой насыщается SO₃, достигая 24 % против 0,3 % в мелкой фракции золы. По мере роста отложения (рис. 4) содержание химически активных СаО и MgO продолжает увеличиваться и достигает макси-



Рис. 4. Химический состав плотного отложения на трубах фестона

мума в поверхностном слое. Соответственно содержание SO₃ нарастает до 42 %.

Одновременно продолжается уменьшение содержания SiO_2 по высоте отложения вплоть до 7,6 %, что подтверждает меньшую вероятность закрепления нейтральных частиц.

Показательным является изменение степени сульфатизации по высоте плотного отложения на трубах фестона (таблица). Для внутреннего слоя $K_{S03}=0,4$, для срединных слоев — 0,57, а для внешнего — 0,72. Такой рост объясняется слоевым строением отложения, которое затрудняет диффузию газов к корню гребня.

Если принять скорость реакции сульфатизации постоянной, пренебрегая изменениями температуры и концентрации SO_2 в газовом потоке в зоне образования отложений, то степень сульфатизации отложения по высоте должна быть одинаковой. В нашем случае очевидно, что длительность протекания реакции разная по слоям. Чем больше период взаимодействия с газовым потоком, тем больше в слое $CaSO_4$. Следовательно, скорость роста гребня со временем замедляется вплоть до нулевой (и высота отложения остается постоянной), а степень сульфатизации оказывается максимальной.

Предпринята попытка оценить влияние продолжительных промежутков времени нахождения отложения в условиях работающего котла на изменение характеристик при отсутствии средств очистки поверхностей нагрева. Для этого исследовались пробы №№ 2–4 (таблица). В пробах №№ 3, 4, взятых через 284 и 394 сут., как и в начальной, содержание СаО практически постоянно вне зависимости от времени отбора пробы и составляет для

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рундыгин Ю.А., Шестаков С.М., Усик Б.В. и др. Освоение и исследование котла БКЗ-420-14-9 с вихревой топкой ЛПИ // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 12–16.
- Отс А.А., Прикк В.А., Арро Х.Х. и др. Исследование химического состава летучей золы при вихревом сжигании сланцев // Труды Таллиннского политехнического института. – 1977. – № 416. – С. 91–101.
- Лебедев Б.В., Заворин А.С. Распределение минеральной части угля в горизонтальном вихревом низкотемпературном факеле // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 15–20.

бессульфатной массы 54...55 %. На одном уровне находится содержание SO₃ (33...35 %). При этом K_{SO_3} меняется в пределах 0,55...0,63, причем максимум приходится на заключительную пробу.

Заключение

Применение технологии безмельничного сжигания для энергетического котла показало возможность бесшлаковочной работы на протяжении всего времени исследования. Натрубные отложения на поверхностях нагрева зафиксированы только в виде нелимитирующих несение нагрузки золовых наростов на испарительных трубах конвективного газохода, уплотняющихся за счет сульфатизации в потоке дымовых газов.

Безмельничное сжигание усиливает влияние аэродинамических факторов топочного процесса не только на экономичность работы котла, но и на распределение по фракциям химических элементов в летучей золе. Отсутствие обогащения оксидом кремния мелких фракций золового уноса из топки наложило отпечаток на механизм образования плотных отложений на конвективных поверхностях нагрева. Высота образовавшегося отложения зависит от аэродинамических условий в зоне загрязнения и определяет уровень его сульфатизации. Степень сульфатизации увеличивается по мере приближения к внешней поверхности гребня отложения. Скорость роста отложений меньше скорости сульфатизации его по высоте. Это позволяет обоснованно регламентировать оснащение котла средствами очистки поверхностей нагрева, а также их эксплуатационное использование.

- Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 144–150.
- Микк И.Р. Об образовании отложений и окаменелостей летучей золы на трубах // Труды Таллиннского политехнического института. – 1957. – № 102. – 23 с.

Поступила 01.04.2010 г.