

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорожков А.А. Развитие отечественного котлостроения для современной промышленной энергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 48–51.
2. Ахмедов Д.Б., Калинин Д.С., Ветров Н.В., Калинин В.Я. Выявление и предотвращение причин аварий на котлах ДКВР-20, работающих на газе и мазуте // Промышленная энергетика. – 1974. – № 7. – С. 20–21.
3. Манькина Н.Н. Исследование условий образования железокисных отложений // Теплоэнергетика. – 1960. – № 3. – С. 8–12.
4. Тайлашева Т.С. Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 42–47.
5. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сб. докл. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.
6. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В., Обухов С.В. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 175–181.
7. ГОСТ 12503-75. Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования.
8. ГОСТ 22762-77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. Общие требования.
9. СО 34.37.306-2001 (РД 153-34.1-37.306-2001). Методические указания по контролю состояния основного оборудования тепловых электрических станций. Определение количества и химического состава отложений. Общие требования.

Поступила 21.10.2009 г.

УДК 621.182

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ УГЛЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ВИХРЕВОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ФАКЕЛЕ

Б.В. Лебедев, А.С. Заворин

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

Представлены результаты экспериментального исследования процессов в низкотемпературной вихревой топке, работающей по безмельничной технологии сжигания бурого угля. Установлена специфика формирования минерального балласта факела под влиянием аэродинамических и температурных условий топочного процесса.

Ключевые слова:

Минеральная часть угля, топочная среда, зондирование, вихревой факел, фракционный состав.

Key words:

Coal mineral matter, furnace medium, probing, eddy flame, fractional composition.

Введение

Единственным в истории техники образцом энергетического котлоагрегата большой мощности, в котором было реализовано сжигание немолотого (мелкодробленого) бурого угля в низкотемпературном факеле по схеме Ленинградского политехнического института, являлся паровой котел типа Е-420-140 (БКЗ-420-140-НТВ). Уникальность котла состояла не только в использовании безмельничной технологии топливосжигания, но и в том, что он сконструирован и изготовлен специально для этой технологии, в отличие от других известных в энергетике котлов с низкотемпературными топками, но меньшей производительности, которые были реконструированы с пылевидного сжигания [1].

Поскольку принципы организации и режимы протекания топочного процесса влияют на термохимические преобразования минеральных компо-

нентов топлива и на состав продуктов сгорания [2], изучение особенностей их формирования при различных сочетаниях конструктивных и режимных факторов имеет важное теоретическое и практическое значение для совершенствования современных технологий угольной энергетики. В связи с этим выполненные в рамках настоящей работы исследования применительно к топочной камере, оригинальной по конструкции и способу сжигания, направлены на получение новых результатов о преобразовании минеральных компонентов канско-ачинских углей в так называемых натуральных условиях котла, находящегося под эксплуатационной нагрузкой.

Характеристика объекта исследования

Котел БКЗ-420-140 паропроизводительностью 420 т/ч (рис. 1) проектировался как головной и од-

новременно опытный образец для работы на дробленке бурого угля Ирша-Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна.

Газоуплотненная топочная камера – 1 прямоугольного сечения имеет на фронтальной стене восемь прямооточных горелок – 2, расположенных в один ряд с углом наклона 45 градусов. В устье холодной воронки по всей ширине топки в два яруса расположены сопла нижнего дутья – 3. В средней части топки по нижней плоскости аэродинамического выступа заднего экрана расположены сопла третичного дутья – 4. Еще одной особенностью этой топки является наличие газоотбойных элементов, роль которых играют надгорелочный козырек – 5, выполненный из труб фронтального экрана, и задняя плоскость горизонтального радиационного пароперегревателя – 6 вместе с нижней плоскостью аэродинамического выступа и прилегающей к нему частью заднего экрана. Котел оборудован четырьмя независимыми системами подачи топлива, каждая из которых включает в себя бункер сырого угля, шнековый питатель сырого угля, систему трубопроводов для эжекторной подачи топлива в топку и работает на две горелки – 2.

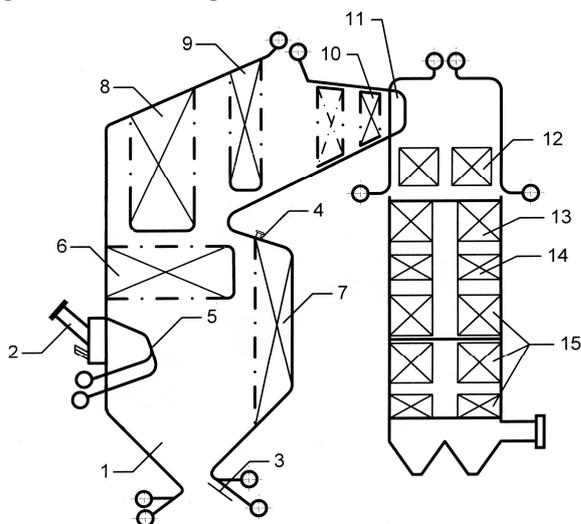


Рис. 1. Схема компоновки котла БКЗ-420-140-9: 1) топочная камера; 2) горелки; 3) сопла нижнего дутья; 4) сопла третичного дутья; 5) газоотбойный элемент; 6) горизонтальный радиационный пароперегреватель; 7) испарительные двухсветные панели и вертикальный радиационный пароперегреватель; 8, 9) ступени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

За счет распределения вторичного воздуха между горелочным – 2 и нижним – 3 – через сопла холодной воронки дутьем с участием третичного дутья – 4, а также за счет внутритопочных отклоняющих элементов – 5 достигается разделение факела на несколько вихревых зон с горизонтальной осью вращения. Частицы топлива по мере выгорания в нижней, наиболее загрязненной, вихревой зоне перемещаются в верхнюю, где завершается их

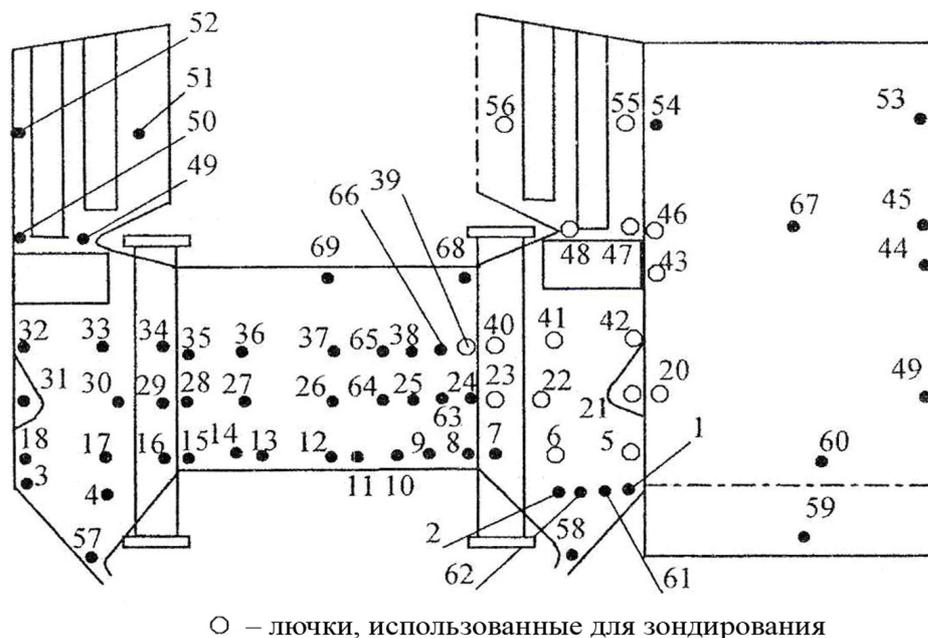
горение. Благодаря такой аэродинамике получается более размытое ядро горения, выравниваются температуры и падающие тепловые потоки по высоте топочной камеры, что, по замыслу разработчиков, позволяет уменьшать образование оксидов азота и интенсивность шлакования радиационных поверхностей нагрева. Стабилизации аэродинамики способствует размещение вдоль заднего экрана и перпендикулярно к нему испарительных ширм – 7, которых в исходном варианте было восемь, а при первой реконструкции сокращено до четырех. Для уменьшения износа экранов топки и потерь топлива с провалом при реконструкции в устье холодной воронки был смонтирован воздушно-каскадный классификатор.

Пароперегреватель состоит из радиационных и конвективных ступеней. В топке расположены шесть вертикальных ширм – 7, установленных вместо четырех испарительных при реконструкции с шагом 1200 мм. В центральной части топки размещены две горизонтальные ширмы – 6 высотой 2160 мм с коллекторами на фронте котла. На выходе из топки размещены две ступени ширмового пароперегревателя – 8, 9, а в горизонтальном газоходе – два пакета конвективных ступеней – 10, 11. Кроме этого пароперегревательными поверхностями являются экраны боковых стен горизонтального газохода, потолка, фронтальной и задней стен конвективной шахты. В двухпоточной конвективной шахте расположены двухступенчатые водяной экономайзер – 12, 14 и трубчатый воздухоподогреватель – 13, 15.

Методы исследования

Физико-химические преобразования минеральной части угля в топке исследовались посредством зондирования топочной среды с помощью охлаждаемого пылезаборного зонда по известной методике [3]. Возможности зондирования определялись наличием эксплуатационных лючков, пригодных для перемещения зонда на различную глубину и расположенных вдоль основной траектории факела, что связано с задачей отбора частиц как по его длине, так и по сечению (рис. 2). В каждой зондируемой точке кроме того выполнены газовый анализ, измерения скорости и температуры газового потока. Скорость потока измерена с помощью четырехканального аэродинамического зонда, протарированного трубкой Прандтля, а температура газов – с помощью жезловой термопары, протарированной по отсосному пирометру.

С целью уменьшения трудоемкости экспериментов на действующем котле для составления программы зондовых исследований использованы результаты гидравлического моделирования аэродинамики топки [4], которое выявило три вихревые зоны, расположенные по высоте топки: нижнюю, центральную и верхнюю (рис. 3). Другой особенностью аэродинамики является ее двумерная структура, ориентированная параллельно боковым стенам. Это объясняется, во-первых, параллельным истече-



○ — лючки, использованные для зондирования

Рис. 2. Развертка стен топки со схемой расположения лючков

нием горелочных струй из щелевых горелок, расположенных на фронте топки, во-вторых, ориентацией сопел нижнего дутья, создающих равномерно распределенный по ширине и движущийся по всему фронтальному скату холодной воронки поток вторичного воздуха, и, в-третьих, наличием внутритопочных ширм, размещенных параллельно боковым стенам по всей высоте тыльной стены топки.

Моделирование показало, что аэродинамика нижней вихревой зоны играет определяющую роль в организации всей структуры потоков в топке и, в свою очередь, зависит в наибольшей мере от таких режимных параметров как соотношение расходов, а также импульсов движения горелочного и нижнего дутья. Если поток нижнего дутья имеет настильное движение вдоль фронтального ската холодной воронки и скорость, достаточную для его проникновения под надгорелочный козырек, то вихревое движение потока устанавливается во всех трех зонах. Это условие выполняется в диапазоне отношения долей горелочного и нижнего дутья от 0/100 до 30/70. При дальнейшем увеличении доли горелочного дутья область слияния двух потоков смещается вглубь топки, появляется и постепенно увеличивается часть потока нижнего дутья, которая проходит в центральную часть объема топки, минуя область под надгорелочным козырьком. При режиме с отношением 45/55 эта часть потока резко возрастает, в результате чего вихревое движение в нижней зоне деградирует за счет ослабления опускного потока вдоль заднего ската холодной воронки. Проскок потока нижнего дутья непосредственно в центральную часть объема топки приводит к так называемому фонтанирующему режиму, который характеризуется ликвидацией вихревой структуры факела, повышением температурного уровня и резким увеличением выноса невыгоревших частиц.

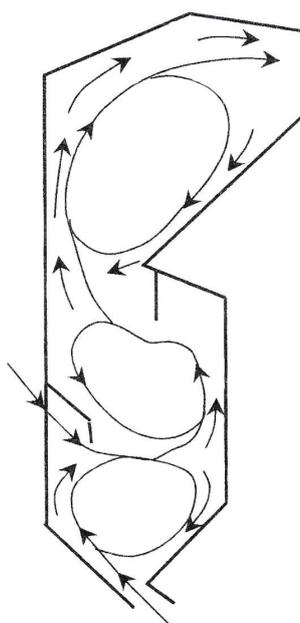


Рис. 3. Схема аэродинамики топки на гидромодели

Анализ результатов гидравлического моделирования аэродинамики топки позволил значительно сократить объем натурных экспериментов как по количеству зондируемых зон факела, так и по количеству измерений в каждой зоне. С точки зрения оценки предваряющей информативной обеспеченности исследований можно сравнить максимальные значения скорости потока, полученные для соответствующих зон: определенные расчетом по данным гидромоделирования составили 20...25 м/с, полученные непосредственными измерениями — 18...23 м/с [4].

Таблица. Характеристики выгорания частиц, вынесенных из топки

| Размер фракции, мкм | Характеристики | | | |
|---------------------|------------------------|----------------------------|---|--|
| | Весовой выход, R , % | Степень выгорания, β | Содержание горючих веществ, C^{dat} , % | Распределение горючих веществ, C_R^{dat} |
| Менее 46 | 25,0 | 0,994 | 6,5 | 0,05 |
| 46...60 | 9,3 | 0,993 | 7,0 | 0,02 |
| 60...100 | 12,2 | 0,972 | 21,9 | 0,08 |
| 100...200 | 12,5 | 0,918 | 46,0 | 0,18 |
| 200...500 | 27,0 | 0,864 | 59,0 | 0,51 |
| Более 500 | 14,0 | 0,960 | 35,0 | 0,16 |

Зондирование топочной среды выполнено через лючки (рис. 3), расположенные на правой боковой стене и прилежащей к ней части фронта и тыла топки на глубину в диапазоне от 0,3 до 2,1 м. Обнаруженная при гидромоделировании [4] верхняя вихревая зона из-за отсутствия необходимых лючков на выходе из топки и в горизонтальном конвективном газоходе оказалась доступной для зондирования лишь в восходящей ветви потока. По этой же причине не охарактеризована нисходящая вдоль заднего ската холодной воронки ветвь нижней вихревой зоны.

Результаты и обсуждение

Максимальный уровень температур в топке зафиксирован в области лючка 5 (см. рис. 2) – 1540...1570 К. Здесь происходит горение крупных частиц топлива, их пневмо- и терморазмол, после которого легкие частицы выносятся в центральную вихревую зону. В центральной части нижней вихревой зоны (лючок 6) температура топочной среды находится на уровне 1300 К, а содержание кислорода – около 1,5 %.

Вихревая структура факела определяет протекание процессов и в других зонах топки. Прежде всего она влияет на перераспределение топливных частиц, попадающих из нижней вихревой зоны в центральную. На периферии вихря, в области лючков 23 и 40, происходит увеличение доли крупных частиц (рис. 4). В центральной его части (лючок 41) и в застойных зонах (лючки 42 и 48), наоборот, отобранные пробы обеднены крупными частицами и содержат увеличенную долю мелких фракций. Вблизи лючка 41 происходит выгорание мелких частиц при высоком избытке воздуха (содержание кислорода порядка 8,0 %), вследствие чего здесь отмечена наибольшая для центральной вихревой зоны температура – 1280 К. В застойной зоне вблизи лючка 42 содержание кислорода падает до 4,5 %, а температура – до 1180 К. Основной поток, образующий центральную вихревую зону, движется вдоль заднего экрана в области лючков 23 и 40, затем козырьком, опущенным с аэродинамического выступа, отклоняется к фронтальному экрану в направлении лючков 47 и 55.

На этой траектории имеет место наибольшая концентрация пыли и более высокие значения не-

дожога (рис. 5), что соответствует повышенному содержанию крупных частиц. Увеличение содержания горючих в отборах из лючка 55 по сравнению с пробами из лючка 47 объясняется тем, что в области лючка 55 поток разворачивается в сторону горизонтального конвективного газохода. Мелкая фракция отбивается вслед за потоком газов, а грубая (более 200 мкм – по рис. 4) еще продолжает движение в прежнем направлении, увеличивая тем самым долю крупных частиц и соответственно содержание горючих веществ в отборах из лючка 55. Значительное перераспределение частиц, происходящее в верхней вихревой зоне, показывает разница в содержании крупных фракций (рис. 4) и горючих веществ (рис. 5) в отборах из лючка 55 и лючка 56: в области лючка 56 преобладает мелкая фракция пыли.

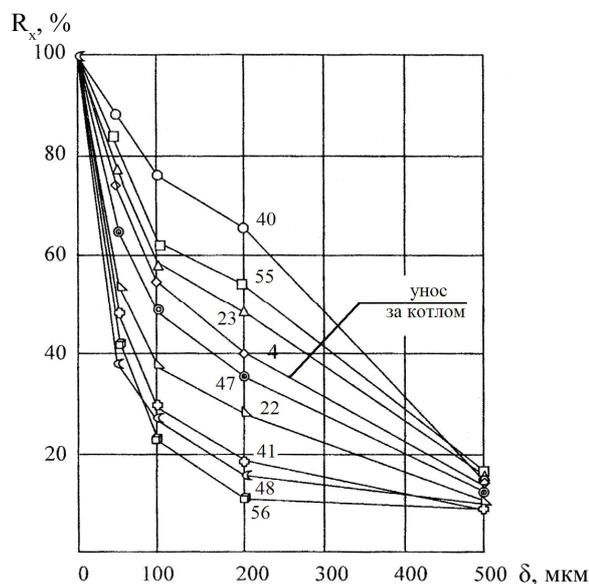


Рис. 4. Интегральные зерновые характеристики отборов частиц из факела и уноса за котлом. Цифрами обозначены номера лючков, см. схему на рис. 2

На распределение пылезоловых частиц по размерным фракциям оказывают влияние нагрузка котла, избыток воздуха в топке и доля нижнего дутья, за счет которого происходит изменение избытка воздуха при изменении нагрузки. Действие этих факторов приводит к изменению объема газов в топке и уровня скоростей в вихревых зонах, в результате чего меняется вынос крупных частиц, прежде всего из нижней вихревой зоны.

Характеристики пофракционного выгорания исследованы по пробам уноса, отобраным за котлом, и для одной из проб представлены в таблице. Как и в обычных пылеугольных топках, содержание горючих веществ нарастает по мере укрупнения частиц, но только до размера 500 мкм. В частицах крупнее 500 мкм содержание горючих веществ резко уменьшается. Проведенные микроскопические исследования фракции крупнее 500 мкм показали, что среди них частиц механического недожога намного меньше, чем полностью минерализо-

ванных частиц. Последние представлены хорошо идентифицируемыми породными осколками размером до 1...2 мм.

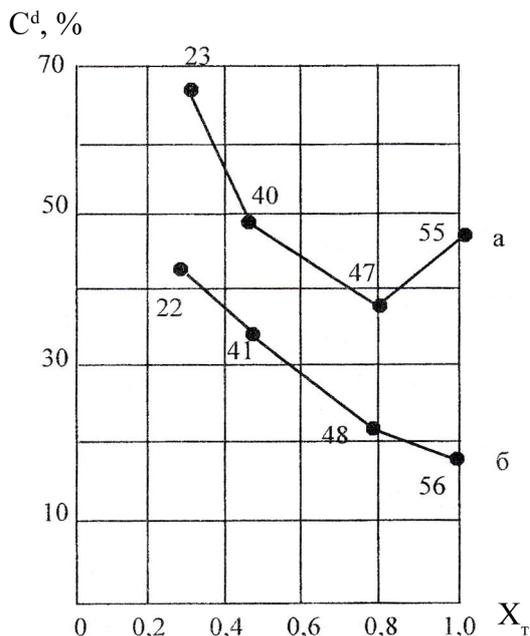


Рис. 5. Изменение содержания горючих в частицах по относительной высоте топки X_T : а) основная траектория (высококонцентрированный поток); б) траектория менее концентрированного потока. Цифры обозначают лючки, см. схему на рис. 2

Данная особенность фракционного состава минеральных компонентов в низкотемпературном вихревом факеле также является следствием его аэродинамической структуры. Нижняя вихревая зона топки для последующих зон факела играет роль своеобразного предвключенного мелющего устройства. Попадающая в нее дробленка при больших скоростях горелочного и нижнего дутья подвергается как термо-, так и пневморазмолу. Угольная составляющая значительно легче измельчается, так как участвует в процессе выгорания органической массы, растрескивается за счет напряжений, возникающих при интенсивном нагреве и выходе летучих веществ, разрушается при соударении с другими частицами и с ограничивающими нижнюю вихревую зону поверхностями. По этим причинам доля частиц топливного недожога во фракции с размером более 500 мкм невелика. В противоположность этому породные включения труднее измельчаются и, задерживаясь в нижней вихревой зоне, циркулируют до тех пор, пока не будут вынесены восходящим потоком. Соответствующая скорость витания частиц породы в топке достигается при измельчении до размера 1...2 мм. Такие частицы выносятся из топки и далее не размельчаются.

Таким образом, исходный гранулометрический состав поступающего в топку топлива и условия организации факела формируют три группы частиц по характеру их минеральной составляющей.

Первая группа представляет собой частицы внешних включений в уголь в виде сравнительно крупных породных фрагментов. В этом проявляется одно из существенных отличий безмельничного сжигания в топке с низкотемпературным вихрем. В обычных системах пылеприготовления в вентилируемой мельнице породные примеси, имеющие более высокую плотность, переизмельчаются по сравнению с угольной составляющей и переходят в наиболее мелкие фракции.

Вторая группа частиц составляет самую мелкую фракцию. Следуя описанным выше условиям термо- и пневмоизмельчения, среди ее минеральных компонентов должны преобладать наиболее тесно связанные с органикой соединения внутренней зольности, а количество этой фракции – нарастать по мере приближения потока к выходу из топки.

Третья группа частиц представлена широкой гаммой остальных размерных фракций, в которых минеральные компоненты преимущественно сосуществуют с органическим веществом. Наиболее значительной среди них является фракция с размером 200...500 мкм. Судя по параметру C_R^{daf} (см. табл.), в этой фракции сосредоточено более половины всего недожога топлива. По мере подъема факела доля фракции $\delta=200...500$ мкм уменьшается за счет выгорания, и благодаря этому пополняются фракции более мелких классов вплоть до самой мелкой ($\delta < 46$ мкм).

Естественно, поведение минеральной части угля в факеле определяется двумя наиболее представительными фракциями частиц: $\delta < 46$ и $\delta=200...500$ мкм, соотношение между которыми изменяется в процессе выгорания. Промежуточные по размеру фракции не являются настолько значительными и характеризуют переходное состояние между наиболее мелкими и крупными. Эти выводы подтверждает установленная [4] корреляция между содержанием горючих веществ, с одной стороны, и соотношением весового выхода фракции $\delta < 46$ и $\delta=200...500$ мкм, с другой (рис. 6), и отсутствие подобной корреляционной связи относительно других фракций.

Распределение химических составляющих минеральной части угля в различных частях топки показано на рис. 7. Изменение содержания SiO_2 на графике отражает тенденцию накопления породных частиц в нижней вихревой зоне и перемещение их в верхнюю часть топки по мере измельчения. Обратная картина наблюдается с CaO , основным компонентом внутренней зольности: по высоте топки содержание его 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

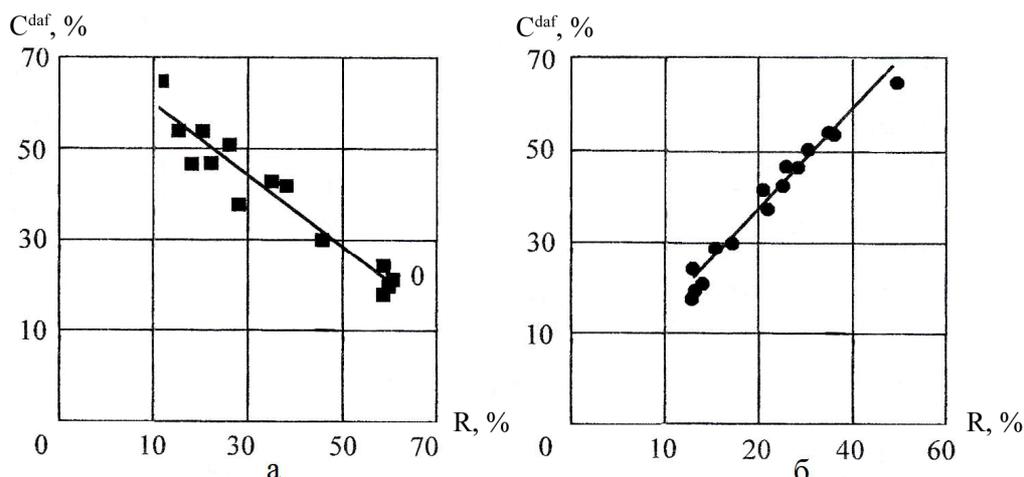


Рис. 6. Зависимость содержания горючих веществ в отборах частиц из факела от содержания фракций: а) $\delta < 46$ мкм и б) $\delta = 200 \dots 500$ мкм

вихревых зонах меньше смещаются к периферии под действием центробежных сил и проходят через центральную часть топки по укороченной траектории, что приводит здесь к повышению концентрации оксида кальция.

Заключение

Аэродинамические и температурные условия топочного процесса с горизонтальной осью вращения низкотемпературного вихря при сжигании канско-ачинского бурого угля по безмельничной технологии создают специфику особенностей минерального балласта факела. Она выражается прежде всего в обогащении нижней вихревой зоны внешними составляющими минеральной части угля за счет накопления породных частиц. Кроме того, пристенные области основной траектории факела с высокой концентрацией дисперсной фазы также обогащены соединениями кремния и железа в составе наиболее крупных и тяжелых фракций. Компоненты внутренней зольности, содержащиеся преимущественно в мелких и легких фракциях, которые меньше смещаются к периферии в вихревых зонах, проходят в факеле по укороченным траекториям, что создает повышение их содержания в центральных областях объема топки.

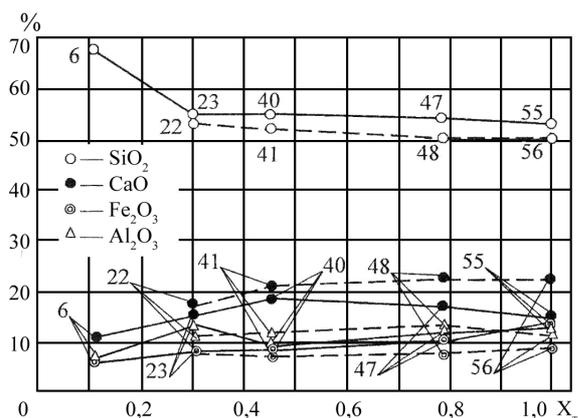


Рис. 7. Изменение химического состава бессульфатной массы золы в частицах по высоте топочной камеры: ---- — основная траектория (высококонцентрированный поток); — — траектория менее концентрированного потока. Цифры обозначают лючки, см. рис. 2

Содержание горючих веществ в летучей золе в пределах топочного объема является пропорциональным весовым долям двух групп фракций с размерами менее 46 и 200...500 мкм и не зависит от режима вихревой аэродинамики топочного объема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рундыгин Ю.А., Шестаков С.М., Усик Б.В. и др. Освоение и исследование котла БКЗ-420-14-9 с вихревой топкой ТПИ // Теплоэнергетика. — 1988. — № 1. — С. 12–16.
2. Буваков К.В., Заворин А.С., Гладков В.Е. Морфологические особенности золы от энергетического сжигания бурого угля // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 5. — С. 136–140.
3. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. — М.: Энергия, 1977. — 296 с.
4. Лебедев Б.В. Совершенствование аэродинамики топочного процесса при сжигании дробленки ирша-бординского угля (на примере котла БКЗ-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск: ТПИ, 1991. — 16 с.

Поступила 02.09.2009 г.