

- роиств опасных производственных объектов // Контроль. Диагностика. 2004. № 5. С. 19 – 23.
10. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Фольмер С.В. Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности // Контроль. Диагностика. 2009. № 1. С. 22 – 32.
 11. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Кононов П.В. и др. Жаропрочность и поля внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях // Контроль. Диагностика. 2009. № 2. С. 45 – 51.
 12. Смирнов А.Н., Фольмер С.В., Абабков Н.В. Локальные поля внутренних напряжений в сварных соединениях, спектрально-акустический метод их выявления и синергетический подход к материаловедению // Вестник КузГТУ. 2009. № 3. С. 28 – 38.
 13. Смирнов А.Н., Фольмер С.В. Влияние исходной структуры и физико-механических свойств конструкционных сталей на их акустические характеристики // Вестник КузГТУ. 2008. № 3. С. 73 – 75.
- © 2013 г. А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков,
С.В. Фольмер
Поступила 29 ноября 2013 г.

УДК 662.8

***В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко, А.П. Подольский, А.А. Рыбушкин, М.В. Темлянецв,
С.А. Казимиров***

Сибирский государственный индустриальный университет

РАЗРАБОТКА АГРЕГАТА И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

К настоящему времени в Кузбассе накоплено значительное количество отходов обогащения угля. Это связано с несовершенством действующих на углеобогащительных фабриках технологий, поскольку в отходах углеобогащения содержание угля может достигать 25 % и более. Отходы углеобогащения, хотя и содержат значительное количество угля, но в качестве топлива имеют крайне ограниченную область применения, поскольку характеризуются высокой зольностью, влажностью и мелкодисперсным гранулометрическим составом [1]. Большинство современных котельных установок не предназначены для работы на таком виде топлива. Для слоевого сжигания отходов углеобогащения требуется их окомкование или брикетирование. Сжигание дисперсного топлива в кипящем слое, открытом факеле или приготовление на его основе водугольных суспензий значительно усложняет и удорожает конструкцию котельного агрегата или требует соответствующей топливподготовки [2], что снижает привлекательность отходов углеобогащения как относительно распространенного и дешевого вида топлива.

В связи с этим в Сибирском государственном индустриальном университете проведены исследования по разработке тепловой установки, работающей на принципах вихревых процессов, и технологии эффективного сжигания дисперсных отходов углеобогащения.

Поскольку теплотворная способность отходов углеобогащения значительно ниже, чем у традиционных видов топлива, в тепловой установке процессы сжигания, генерации тепла и нагрева теплоносителя разделены: сжигание реализовано в отдельной топке, теплообменник вынесен за пределы топочного объема как самостоятельный агрегат. В пользу такого решения служит то обстоятельство, что значительная часть отходов углеобогащения имеет высокое содержание золы, достигающее в некоторых случаях до 40 %. В связи с этим теплообменная часть агрегата должна быть приспособлена к большим потокам (расходам) твердого материала. Здесь же конструктивно решается вопрос улавливания золы, которая находится в пылевидном состоянии.

Конструкция разработанной цилиндрической вихревой топки (подобной [3]) схематично представлена на рис. 1.

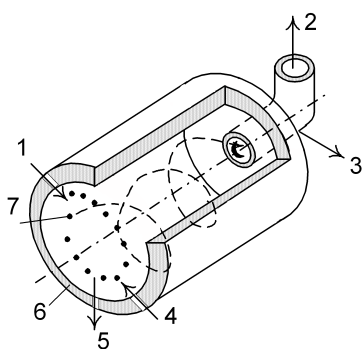


Рис.1. Конструкция разработанной топki (половина сечения)

1 – подача дисперсного топлива шнековым питателем; 2 – отбор продуктов сгорания и подача в теплообменный аппарат; 3 – удаление золы мелкой фракции; 4 – подача вентиляционного воздуха; 5 – удаление золы крупной фракции; 6 – огнеупорная футеровка; 7 – траектория движения частиц топлива и золы

В торцевой стенке топki в нижней части выполнено окно для розжига и удаления золы. Дисперсное топливо подается в топку шнековым питателем. Регулирование его расхода выполняется при помощи частотного преобразователя. Диапазон изменения частоты 10 – 50 Гц.

Для отработки технологии, режимов и параметров сжигания различных видов топлива в созданном агрегате проведены серии экспериментов.

Для измерения температуры и поля скоростей в цилиндрическую стенку топki в направлении к оси вмонтировали огнеупорную трубку для ввода термопары или датчика скорости.

В качестве окислителя при проведении экспериментов использовали атмосферный воздух, который подается в топку вентилятором острого дутья. Расход дутьевого воздуха измеряли специально разработанным для этих целей расходомером типа сужающего устройства с малым аэродинамическим сопротивлением. Температуру измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Перепад давления измеряли дифференциальным манометром. Измерения скорости выполняли посредством цилиндрического зонда с внутренним диаметром 8 мм и диаметром приемного отверстия 0,8 мм. Методика измерений описана в работе [4]. В процессе измерения скорости потока в топке во время сжигания топлива измеряли температуру дымовых газов, расходы воздуха и топлива, затем определяли состав продуктов сгорания и их плотность. Во время проведения измерений температуру в топке и все параметры горения поддерживали постоянными.

Проведена серия экспериментов по сжиганию в вихревой топке мощностью 0,8 МВт углей марки «Д», топлив с различной зольностью, в которых использовали смеси угля и

золы-уноса котельной, угля (промпродукта) обогатительной фабрики ЦОФ Сибирь с зольностью 40 % и шлама.

При сжигании угля марки «Д» его предварительно отсеивали от крупных кусков на сите 10 и 20 мм. Низшая теплота сгорания Q_n^p угля составляла 23430 кДж/кг, зольность 18 %. Фракционный состав угля, отсеянного на сите 10 мм (числитель) и 20 мм (знаменатель), приведен ниже:

Состав угля,	
мм	%
5 – 10	23,9
10 – 20	37,0
1 – 5	56,5
5 – 10	19,1
0,56 – 1,00	9,2
1,00 – 5,00	35,6
0,15 – 0,56	7,7
0,56 – 1,00	5,8
– 0,15	2,7
0,15 – 0,56	4,9
–	–
– 0,15	1,7

Видно, что основная масса угля имела фракционный размер менее 5 мм.

При исследовании горения угля с различной зольностью в него в разных пропорциях добавляли золу-унос котельной насыпной плотностью 440 кг/м³ и зольностью 70,4 %. Теплота сгорания золы-уноса, используемой в экспериментах, составляла 10045 кДж/кг. Характеристики исследуемых смесей следующие:

Характеристика смеси	Значение характеристики при объемном соотношении угля и золы			
	1/1	1/1,5	1/3	1/4
Теплотворная способность, кДж/кг	20210	18940	18000	16610
Зольность, %	30	35	39	44
Плотность, кг/м ³	820	744	693	630
Содержание летучих, %	32,0	28,2	25,2	20,8

Сжигание угля с подмешанной золой проводили при температуре 1180 – 1200 °С. При сжигании смеси на выходе из топki наблюдали повышенный вынос золы мелкой фракции.

Проведенная серия экспериментов показала, что при сжигании топлива с соотношением

угля к золе 1/1 – 1/3 топка работает устойчиво, температура рабочего пространства и дымовых газов поддерживается на достаточно высоком уровне. При соотношении 1/4 температура в топке быстро снижалась. В связи с этим приходилось принимать дополнительные меры для вывода топки на рабочий режим. Для такого количества золы в топливе необходимо большее содержание летучих компонентов в топливе.

Установлено, что процесс подачи угля шнеком протекает устойчиво при влажности W менее 15 %. Оптимальная влажность угля для винтового шнека составляет 10 – 12 %. Если $W > 15$ %, то для стабильной работы шнекового питателя в уголь необходимо подавать опилки или сухую пылевидную золу в количестве не более 5 % по массе.

Исследование аэродинамических параметров установки

Одной из наиболее важных характеристик аэродинамики процесса горения топлива является тангенциальная составляющая скорости. Эту характеристику измеряли как при холодных продувках, так и при сжигании угля при температурах в рабочем пространстве топки 1230 – 1260 °С с расходом угля $G = 51$ кг/ч и расходе воздуха $Q = 1150$ м³/ч.

При проведении горячих экспериментов измеряли радиальное распределение температуры в топке. Знание распределения температуры позволило определить поле скоростей потока, так как при обработке результатов измерений необходимо знать плотность газа в каждой точке пространства. В процессе измерения примерно в течение одного часа поддерживались постоянными значения расхода топлива и воздуха. Отклонения не превышали 3 – 5 %.

На рис. 2 показано типичное распределение скорости по радиусу топки. По оси ординат отложено отношение значений текущей тангенциальной скорости к скорости на периферии топки (v/v_0). Измерения выполняли при различных расходах воздуха, при этом распределение скорости было аналогичным.

Профили скорости в обоих случаях подобны практически для всех значений радиуса r топки за исключением приосевой области. Положение максимума скорости в холодной топке находится при $r = 0,08$ м. Максимум скорости в горячей топке располагается при $r = 0,05$ м. Смещение максимума скорости обусловлено изменением уровня закрутки потока за счет увеличения температуры и объема газа. В окрестности стенки скорость равна 15 м/с. Разброс точек

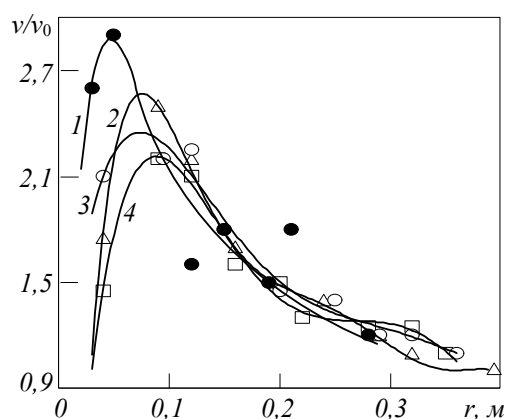


Рис. 2. Распределение тангенциальной скорости по радиусу топки в горячих (● – 0,3 м³/с) и холодных (Δ – 0,3 м³/с, ○ – 0,25 м³/с, □ – 0,18 м³/с) экспериментах для различных расходов воздуха

при измерении скорости обусловлен неоднородным слоем угля в нижней части топки и температурной деформацией датчика в процессе измерения. Увеличение объемного расхода при сохранении циркуляции скорости на выходе из закручивающего аппарата приводит к снижению закрутки потока. Экспериментальные результаты подобны данным для вихревой камеры с плоскими торцами [5].

Экспериментальные данные (рис. 2) в виде распределения циркуляции скорости $\Gamma = v_\phi r$ (v_ϕ – тангенциальная компонента скорости потока в цилиндрической системе координат) приведены на рис. 3. Обработка данных в таком виде позволяет определить характер течения газов. Постоянное значение циркуляции скорости характеризует потенциальное вращение потока. В данном случае оно реализуется только при малых расходах воздуха и в относительно небольшой по протяженности области. Экспериментальные точки, полученные при

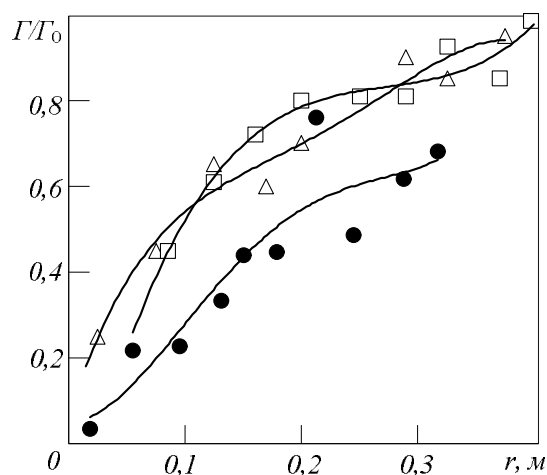


Рис. 3. Распределение циркуляции скорости по радиусу топки при горячих и холодных экспериментах (обозначения те же, что и на рис. 2)

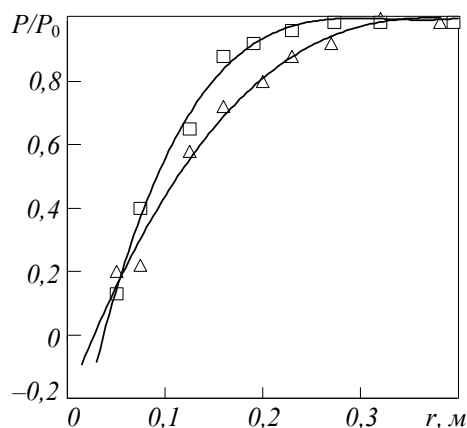


Рис. 4. Распределение давления по радиусу топки (обозначения те же, что и на рис. 2)

холодной продувке с различными расходами воздуха, расположены близко друг к другу. Результаты горячего эксперимента существенно отличаются от результатов холодного эксперимента. Циркуляция скорости возрастает с ростом радиуса. Вероятно, это отличие вызвано изменением на порядок значений вязкости газа и увеличением его объемного расхода.

На рис. 4 представлено распределение давления (P/P_0) по радиусу топки.

Распределение давления также типично для вихревых камер с плоскими торцами [5]. Из рис. 4 следует, что при $r \leq 0,04$ м давление в топке становится меньше атмосферного. Данные по давлению хуже обобщаются для различных расходов воздуха, так как давление более чувствительно к изменениям расхода воздуха. Давление несколько превосходит атмосферное при радиусе, равном радиусу выходного сопла. При малом расходе воздуха давление при радиусе, равном радиусу выходного сопла, равно 200 Па, на периферии оно составляет 500 Па. Такое значение давления в топке значительно облегчает работу дымососа.

Исследование теплотехнических параметров сжигания угля в вихревой топке

При сжигании угля непрерывно измеряли температуру топочного газа в топке. Носик термопары в радиальном направлении находился примерно на уровне выходного сопла топки в радиальном направлении и примерно в середине по ширине топки. Изменение температуры характеризует термическое состояние газа и позволяет следить за процессом горения топлива. В зависимости от состава топлива, режимов и параметров его сжигания температура в топке может изменяться в достаточно широких пределах – от 600 до 1000 – 1500 °С.

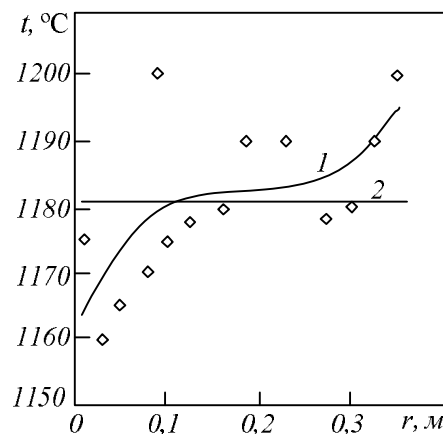


Рис. 5. Распределение температуры (1) и средняя температура (2) по радиусу топки

Распределение температуры t газа по радиусу топки показано на рис. 5.

Измерения температуры в топке выполнены при давлении воздуха $P = 3630$ Па, $Q = 1070$ м³/ч, $G = 45$ кг/ч, в среднем при $t = 1181$ °С. Температура атмосферного воздуха составляла 6 °С. Температура около стенки отличается от таковой в объеме не более, чем на 5 – 10 %. С высокой степенью точности можно считать температуру в топке одинаковой во всем объеме. При постоянной температуре в топке и увеличении расходов топлива и воздуха повышается тепловая мощность установки. Значения мощности топки, рассчитанные по расходу угля и дымового газа, практически совпадают.

Низшее значение мощности для данной топки можно поддерживать на уровне 0,25 МВт, а верхний предел при теплотворной способности угля на уровне 23850 кДж/кг равен 1 МВт. Рабочая мощность для данной топки находится на уровне 0,65 – 0,7 МВт. Ограничение по мощности связано с увеличением выноса недогоревшего угля. Повышение мощности можно обеспечить за счет увеличения теплотворной способности угля или путем отсева крупной его фракции диаметром более 10 – 20 мм.

В процессе сжигания дисперсного топлива в вихревой топке часть угля в виде пыли сгорает в основном объеме топки, а остальная его масса сгорает в области закручивающего аппарата. Вследствие практически полного сгорания угля при количестве воздуха, близком к стехиометрическому, температура дымовых газов в топке поднимается до 1600 °С. Для снижения температуры дымовых газов сжигание топлива проводили со значительным избытком воздуха.

Исследование вредных выбросов при сжигании угля

Зола, взятая из топки при сжигании угля, содержит не более 0,5 – 1,0 % углерода, при сжигании высокосольного топлива – около 3 %. Образующаяся в процессе сжигания зола может являться сырьем для производства строительных материалов, в частности заполнителем для бетонов. Визуально дисперсные частицы золы имеют серовато-желтый цвет. Недогоревшее топливо в виде сажи отсутствует полностью. Уносимая из топки продуктами сгорания зола надежно улавливается пылеулавливающей установкой.

Исследование особенностей сжигания высокосольных углей и шламов

При проведении экспериментов использовали уголь (промпродукт) обогатительной фабрики ЦОФ Сибирь. Размер кусков составлял от нуля до 13 мм. Характеристики топлива: $W = 5\%$, $Q_v^p = 32845$ кДж/кг, $Q_n^p = 19875$ кДж/кг.

В первой серии экспериментов сжигание производили без подготовки промпродукта, при этом температура в топке не поднималась выше 780 °С. В дальнейших экспериментах топку сначала разогревали до 1100 – 1200 °С, а затем подавали уголь. При этом температура топки сначала снижалась до 1000 °С, а затем увеличивалась и достигла 1500 °С. Снижение температуры топки осуществляли за счет увеличения расхода воздуха. Далее поддерживали режим горения при температуре примерно 1100 °С. Сжигание проводили в течение двух часов. Далее наблюдали переход топки в неустойчивый режим работы, обусловленный чрезмерным накоплением золы в рабочем пространстве. После очистки рабочего пространства топки от золы подачу топлива возобновили, однако была достигнута температура только 1000 °С, которая удерживалась в течение длительного времени. В результате проведенных экспериментов было установлено, что для обеспечения устойчивого горения используемого топлива необходимо поддержание температур в топке на уровне не менее 1000 – 1100 °С.

Во второй серии экспериментов уголь дробили до фракции 5 мм на щековой дробилке. Разогрев топки производили на обычном угле, затем подавался промпродукт, температура топки поднималась до 1100 °С. Продолжительность эксперимента составляла 2 ч. Установлено, что устойчивое горение протекает при расходе угля примерно 75 кг/ч, расходе

воздуха 1300 м³/ч, при этом температура топочного газа равна 1280 – 1300 °С.

Горение ухудшается при накоплении значительного количества золы. Проведенные эксперименты подтвердили пригодность промпродукта для использования его в качестве топлива для топок вихревого типа.

В экспериментах по сжиганию шлама его влажность путем частичной сушки была снижена примерно до 10 %, зольность находилась на уровне 40 – 45 %, теплотворная способность менялась от 9460 до 16990 кДж/кг. Топка показала устойчивую работу до тех пор, пока на закручивающем устройстве не начинает плавиться зола. При таком режиме работы золу необходимо удалять каждый час. При плавлении золы параметры закручивающего потока сильно меняются, снижается тепловая мощность установки.

Сжигание шлама с зольностью 40 – 45 % и влажностью до 10 % при высоком содержании летучих компонентов проходит устойчиво, но приходится довольно часто освобождать топку от спекшейся золы. Зола конвективного уноса в виде мелкой пыли сразу попадает в объем камеры горения и тормозит процесс горения. Зола, находящаяся в зоне горения угля, тормозит процесс горения в меньшей степени.

Выводы. Разработанная конструкция топки вихревого типа обеспечивает эффективное сжигание во вращающемся потоке воздуха твердого дисперсного топлива с высокими зольностью и влажностью. Отработаны технология и режимы сжигания угля, промпродукта и шламов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багрянцев В.И., Казимиров С.А., Куценко А.И. и др. Практика и перспективы использования твердых углеродсодержащих отходов в качестве топлива для теплоэнергетических агрегатов // Вестник СибГИУ. 2013. № 3. С. 33 – 38.
2. Лисиенко В.Г., Щелокоев Я.М., Ладыгин М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание в 3-х кн. Кн. 1 / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 608 с.
3. РФ. Патент на полезную модель № 51172. Топка / Багрянцев В.И., Бровченко С.А., Дорн В.И., Лайгер А.Г. 2006 г.
4. Смульский И.И. Об особенностях измерения скорости и давления в вихревой камере. – В кн.: Теплофизика и физическая

гидродинамика. – Новосибирск: Изд-во ИТФ СО АН СССР, 1978. С.125 – 132.

5. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И., Титков В.И. Исследование течения в вихревой камере лазерным доплеровским измерителем скорости//Препринт ИТФ СО АН СССР. – Новосибирск, 1980. – 20 с.
6. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И. Исследование аэродинамики вихревой камеры с центральной струей. – В кн.: Всесоюзное совещание по математическому моделированию высокотемпературных процессов в циклонных и

вихревых аппаратах. – Одесса: изд. Одесского политех. ин-та, 1980. С. 58 – 61.

7. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И. и др. Особенности экспериментального исследования аэродинамики вихревой камеры ЛДИС. – В кн.: Всесоюзный семинар по лазерной доплеровской анемометрии, ее приложения. – Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1981. С. 85 – 88.

© 2013 г. В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко,
А.П. Подольский, А.А. Рыбушкин,
М.В. Темлянец, С.А. Казимиров
Поступила 15 декабря 2013 г.