УДК 662.764

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОРГАНИЗАЦИЮ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Шарабура Т.А., Пинчук В.А.,
Губинский М.В., Шевченко Г.Л., Гордиенко И.В.

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ

Применительно к водоугольному топливу исследовано влияние гидродинамических параметров на организацию сжигания в кипящем слое. В результате исследований получена зависимость скорости начала псевдоожижения и скорости витания от размера частиц водоугольного топлива, установлены пределы существования кипящего слоя при его сжигании. В пределах области существования кипящего слоя для частиц водоугольного топлива установлена зависимость влияния скорости ожижения на степень раскрытия слоя. Установлены значения основных гидродинамических показателей, обеспечивающие эффективное горение водоугольного топлива в кипящем слое для котлов малой мощности.

ВВЕДЕНИЕ

В связи со сложной ситуацией, которая сложилась в энергетической сфере Украины, проблема совершенствования топливно-энергетического баланса страны приобретает особую актуальность. В настоящее время предприятия традиционно ориентированы на использование природного газа, однако запасы природного газа и других дефицитных топлив ограничены и стоимость покупного топлива высока. В связи с этим возникает необходимость использования углей украинских месторождений. Использование угля в энергетике и металлургии должно сопровождаться использованиям новых угольных технологий, которые позволят максимально использовать преимущество угля, а также минимизировать сложность его применения [1]. Рост объемов добычи и потребления угля обуславливает увеличение количества отходов. Этому также способствует вовлечение в эксплуатацию месторождений с плохими горно-геологическими условиями, снижение мощности угольных пластов. Высокозольный уголь и отходы углеобогащения, которые в настоящее время в своем натуральном виде практическинигде не используются, могут стать сырьем для экологически безопасных и экономически эффективных технологий использованияугля в виде водоугольного топлива.

Водоугольное топливо имеет свойства, которые позволяют заменить им твердое, жидкое или газообразное топливо в различных топливопотребляющих агрегатах без существенной их реконструкции, а при необходимости возможно совместное использование водоугольного топлива и других видов топлива – мазута, угля, газа. В процессе приготовления водоугольного топлива исключаются нежелательные минеральные компоненты, уменьшается содержание серы, может быть существенно модифицирована твердая фаза в направлении повышения теплоты сгорания угольного вещества и вводятся специальные химические присадки для предоставления ему заданных потребителем свойств [2,3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из эффективных способов использования водоугольного топлива является его переработка в аппаратах с кипящим слоем. Метод кипящего слоя широко используется в промышленности для проведения процессов сушки, сжигания, газификации, пиролиза топлива, прокаливания материалов. Сжигание водоугольного топлива в кипящем слое эффективно для котлов малой мощности и позволяет обеспечить необходимую эффективность горения водоугольного топлива при различном качестве исходного угля.

Показатели реакционных и тепломассообменных процессов в кипящем слое существенным образом определяются его гидродинамическими показателями. С целью выявления зависимостей влияния основных параметров кипящего слоя на степень раскрытия

© Шарабура Т.А., Пинчук В.А., Губинский М.В., Шевченко Г.Л., Гордиенко И.В.

слоя (отношение ожиженной и насыпной высот слоя), а также возможности создания благоприятных условий сжигания топлива проведены расчетно-теоретические исследования влияния гидродинамических параметров на организацию кипящего слоя для сжигания водоугольного топлива [4,5].

Гидродинамика кипящего слоя в значительной степени зависит от свойств ожижаемого материала. Исследования проводились применительно к водоугольному топливу следующего состава: $C^р = 42\%$; $H^р = 0{,}6\%$; $N^р = 0{,}3\%$; $O^р = 0{,}9\%$; $S^р = 1{,}1\%$; $W^р = 42{,}7\%$; $A^р = 12{,}3\%$. Размер частиц водоугольного топлива составляет 50-250 мкм.. Высота насыпного слоя $H_{нас}$ выбирается из условия равномерного прогрева, исходя из предполагаемого гранулометрического состава слоя, и, обычно, составляет 0,3 -0,7 м [4-6].

При расчетах геометрических характеристик аппаратов, предназначенных для проведения процесса сжигания топлива в кипящем слое, необходимо знать высоту расширенного слоя в рабочем (ожиженном) состоянии $H_{ож.сл}$. Так как материал кипящего слоя имеет значительную полидисперсность фракционного состава, то значение высоты расширенного слоя величина относительная. Слой имеет несколько размытую границу перехода из объема слоя в надслоевую зону, где преобладают горячие газы с горящими частицами мелочи топлива, выносимой из слоя [5, 6]. Оценочное значение высоты расширенного слоя можно определить по формуле

$$H_{ож.сл.} = H_{нас} \cdot \frac{(1-\varepsilon_{нас})}{(1-\varepsilon_{ож})}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{нас}$ - порозность насыпного слоя, $\varepsilon_{ож}$ - порозность ожиженного слоя.

При оценке пределов существования кипящего слоя важным режимным параметром в аппаратах с кипящим слоем является скорость псевдоожижения. Как известно, в состоянии псевдоожижения вес слоя с учетом силы Архимеда уравновешивается перепадом давления в слое [4, 5]

$$\Delta P = g(\rho_м - \rho_г)\cdot(1-\varepsilon)\cdot H = g\cdot(\rho_м - \rho_г)\cdot(1-\varepsilon_{кр})\cdot H_{кр}, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_{кр}$, $H_{кр}$ – порозность и высота слоя в момент начала псевдоожижения (значение $\varepsilon_{кр}$ принимается на 10% выше, чем порозность насыпного слоя, т.к. частицы уже несколько взрыхлены); $\rho_г$, $\rho_м$ – соответственно плотность ожижающего газа и материала,

На основе обобщения экспериментальных данных по аэродинамике кипящего слоя существует множество зависимостей для оценки предельных скоростей потока, ограничивающих область существования кипящего слоя. Наибольшее распространение получила эмпирическая зависимость Тодеса [4, 5, 7]

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{150\dfrac{1-\varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр}^3} + \left(\dfrac{1{,}75}{\varepsilon_{кр}^3}Ar\right)^{1/2}}, \qquad (3)$$

где $Re_{кр}$ – критерий Рейнольдса для уносимых частиц, Ar – критерий Архимеда.

В результате исследований получена зависимость скорости начала псевдоожижения от размера частиц водоугольного топлива, представленная на рис.1

Как видно из полученных данных, присутствует неравномерность ожижения топлива, состоящего из частиц различной дисперсности. Вначале кипящий слой будет состоять из мелкодисперсных частиц, в

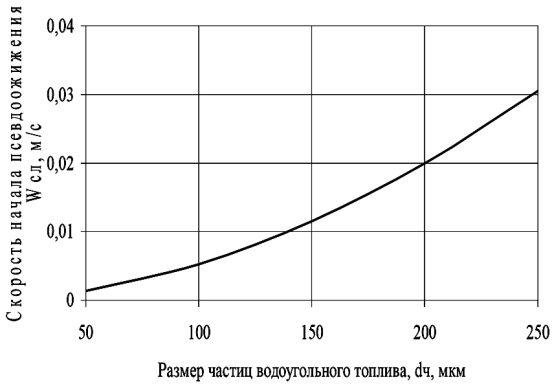

Рис.1 Зависимость скорости начала псевдоожижения от размера частиц водоугольного топлива

то время как большие частицы будут оставаться неподвижными. Полное кипение наступит после преодоления скорости начала псевдоожижения для наиболее крупных частиц слоя.

Верхний предел существования кипящего слоя связан с понятием скорости витания частиц, при которой начинается массовый унос частиц конкретных физических параметров (размер, плотность, форма и др.). Как правило, топливо, поступающее на горение, имеет значительную полидисперсность фракционного состава. Существуют эмпирические зависимости, позволяющие с необходимой точностью оценить вынос материала из псевдоожиженного слоя [4-9]. На рис.2 представлена зависимость влияния скорости воздуха на размер уносимых частиц топлива заданного состава.

Как видно из полученных данных, наблюдается значительное изменение скорости начала уноса для частиц различного размера. Так, при увеличении размера частиц вдвое, скорость начала уноса возрастет в 3-3,5 раза. Мелкие частицы топлива покидают слой несгоревшими, в то время как крупные фракции будут лишь вступать в реакцию горения. Для формирования равномерного

кипящего слоя и более полного сжигания топлива с минимальным уносом, при приготовлении топлива следует использовать однородный помол, что позволит добиться получения частиц одинакового размера. При этом при увеличении надслоевого пространства интенсивность уноса заметно падает до некой критической величины надслоевого пространства.

Полученная зависимость позволяет судить о существенном влиянии скорости воздуха на частицы размером менее 50 мкм, для которых

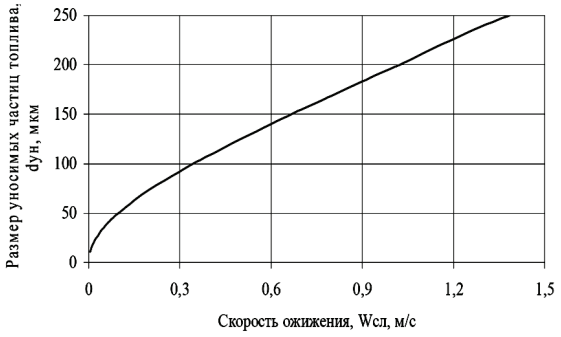

Рис.2 Влияние скорости воздуха, ожижающего слой, на диаметр уноса

незначительные изменения скорости будут приводить к стремительному росту диаметра уноса. Для частиц 100 мкм и более изменение скорости воздуха не будет приводить к скачкообразному изменению размера уносимых частиц, что значительно облегчает контроль эффективной организации слоя.

Выполнены исследования в пределах области существования кипящего слоя для частиц водоугольного топлива размером 50-250 мкм и установлена зависимость влияния скорости ожижения на степень раскрытия, представленная на рис.3.

Из полученных зависимостей видно, что наибольшее влияние скорости ожижения на отношение высот слоев наблюдается для частиц 50 мкм, причем это влияние резко увеличивается по мере приближения к скорости уноса. Полученные данные позволяют судить о сложности контроля кипящего слоя из частиц малого размера (менее 100 мкм), когда влияние скорости ожижения на характеристики слоя высоко. Более стабильные характеристики слоя получены для частиц 150-250 мкм. Как известно, однородность псевдоожиженного слоя твердых частиц повышается с уменьшением их размера. Однако ниже определенного его предела возрастают силы взаимодействия между частицами, что противодействует упорядоченному расширению слоя, способствует агломерации частиц и каналообразованию. Как показывают исследования и литературные данные [4, 5, 7, 9], этот критический размер частиц близок к 40 - 70 мк.

Конкретные параметры сжигания водоугольного топлива в кипящем слое могут зависеть от имеющихся ограничений, например, конструктивных и режимных характеристик имеющегося оборудования, заданного состава исходного сырья, необходимой мощности и др. Обобщенные основные гидродинамические

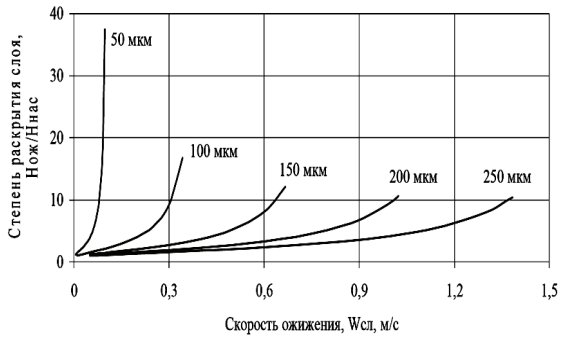

Рис.3 Влияние скорости ожижения на степень раскрытия слоя для частиц водоугольного топлива разного размера

параметры при сжигании водоугольного топлива в кипящем слое для котлов малой мощности представлены на рис.4, 5.

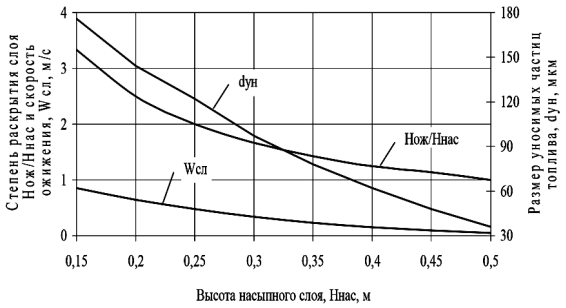

Рис.4 Зависимость гидродинамических параметров от высоты насыпного слоя (для частиц водоугольного топлива 250 мкм)

Таким образом, принимая в качестве основных управляющих параметров или высоту насыпного слоя или размер частиц топлива, можно поддерживать такие режимные параметры которые обеспечат стабильное и эффективное горение водоугольного топлива в кипящем слое при заданных условиях.

На производственной базе ТОВ «Торговый дом «Машресурсы» г. Донецк планируется проведение

экспериментальных исследований сжигания водоугольного топлива в кипящем слое по предложенным параметрам на существующем водогрейном котле. На рис.6 представлена принципиальная схема водогрейного котла совместно с предтопком кипящего слоя.

Рис.5 Зависимость гидродинамических параметров от размера частиц водоугольного топлива (при высоте кипящего слоя 0,2 м)

Водогрейный котел мощностью 1МВт служит для получения тепловой энергии. Габариты предтопка для сжигания водоугольного топлива 2000мм ×1940мм× 1150мм. Предтопок футерован огнеупорным кирпичом с толщиной изоляции 250мм.

Предполагается распыление водоугольного топлива над предварительно нагретым (примерно до 900 ^{o}C) слоем инертного материала. В качестве инертного материала в топках кипящего слоя применяют кварцевый песок, корунд, карборунд, шамот, магнезит и другие материалы с размером частиц от 50 мкм до 2 мм. Для получения высоких значений коэффициента теплоотдачи выгоднее использовать засыпку из мелкозернистого материала.

Предложенная схема позволяет проводить исследования в достаточно широком диапазоне изменения параметров. Для обеспечения стабильного температурного режима и технологических параметров процесса предлагается осуществлять дополнительный подвод энергии, например, предварительный подогрев воздуха и водоугольного топлива. Кроме того, при предварительном подогреве водоугольного топлива происходит деструкция органического вещества топлива с образованием промежуточных горючих соединений, что благоприятно влияет на последующие процессы термической переработки [10, 11].

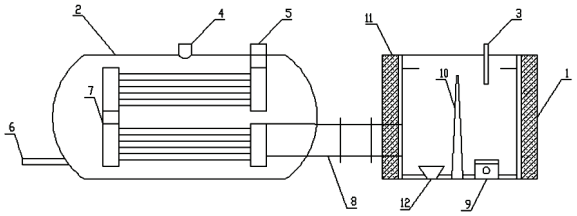

Рис.6 Принципиальная схема установки для сжигания водоугольного топлива в кипящем слое

1 – предтопок кипящего слоя; 2 – водогрейный котел; 3 – топливная форсунка; 4 – выход нагретой воды; 5 – выход продуктов сгорания; 6 - подача воды в котел; 7 – коллекторы поверхностей нагрева; 8 – соединительный газоход; 9 – система подачи воздуха; 10 – устройство, направляющее дымовые газы; 11 – теплоизоляция; 12 - устройство золоудаления

ВЫВОДЫ

Водоугольное топливо имеет свойства, которые позволяют заменить им твердое, жидкое или газообразное топливо в различных топливопотребляющих агрегатах без существенной их реконструкции, а при необходимости возможно совместное использование водоугольного топлива и других видов топлива. Одним из эффективных способов применения водоугольного топлива является его переработка в аппаратах с кипящим слоем. Сжигание водоугольного топлива в кипящем слое эффективно для котлов малой мощности и позволяет снизить зависимость эффективности горения водоугольного топлива от качества исходного угля.

Применительно к водоугольному топливу исследовано влияние гидродинамических параметров на организацию кипящего слоя при сжигании водоугольного топлива. В результате исследований получена зависимость скорости начала псевдоожижения и скорости витания от размера частиц водоугольного топлива, установлены пределы существования кипящего слоя при сжигании водоугольного топлива.

Как видно из полученных данных, наблюдается значительное изменение скорости начала уноса для частиц различного размера. При увеличении размера частиц вдвое, скорость начала уноса возрастет в 3-3,5 раза. Мелкие частицы топлива покидают слой несгоревшими, в то время как крупные фракции будут лишь вступать в реакцию горения. Для формирования равномерного кипящего слоя и более полного сжигания топлива с минимальным уносом, при приготовлении топлива, следует использовать однородный помол, что позволит добиться получения частиц одинакового размера.

Выполнены исследования в пределах области существования кипящего слоя для частиц

водоугольного топлива размером 50-250 мкм и установлена зависимость влияния скорости ожижения на степень раскрытия слоя. Из полученных зависимостей видно, что наибольшее влияние скорости на степень раскрытия слоя наблюдается для частиц 50 мкм, причем это влияние резко увеличивается по мере приближения к скорости уноса. Полученные данные позволяют судить о сложности контроля кипящего слоя из частиц малого размера (менее 100 мкм), когда влияние скорости ожижения на характеристики слоя высоко. Более стабильные характеристики слоя получены для частиц 150-250 мкм.

Конкретные параметры сжигания водоугольного топлива в кипящем слое могут зависеть от имеющихся ограничений, например, конструктивных и режимных характеристик имеющегося оборудования, заданного состава исходного сырья, необходимой мощности и др. Применительно к котлу малой мощности, снабженному предтопком кипящего слоя, определены основные гидродинамические показатели, обеспечивающие эффективное горение водоугольного топлива в кипящем слое при заданных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов Б.Б., Пинчук В.А. Проблемы и перспективы использования в металлургии углей и продуктов их переработки //Інтегровані технології та енергозбереження. -2006.- №2.- С. 122-125.
2. Делягин Г.Н, Каган Я.М, Кондратьев А.С. Жидкое топливо на основе угольных суспензий: возможности и перспективы использования//Российский химический журнал. -1994.- №3.- С. 22-27.
3. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России //Уголь. -2000.- №3.- С. 10-15.
4. Гельперин Н. И., Айнштейн В.Г, Кваша В.Б. Основы псевдоожижения.-М.: Химия, 1967.- 664 с.
5. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник. Под ред. И. П. Мухленова и др. Л. 1986.
6. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое. - М.: Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.
7. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. — М: Энергоатомиздат , 1996. — 352 с.
8. Антонов П.П., Сидоров А.М., Тюркин А.С., Щербаков Ф.В. Уточненный тепловой расчет топок низкотемпературного кипящего слоя // Ползуновский вестник. – 2008. - № 1-2. – С. 115-122.
9. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. - М:"Энергоатомиздат". 1996.-453 с.
10. Шарабура, В.А.Пинчук, Г.Л.Шевченко. Влияние температуры подогрева водоугольного топлива на его свойства и состав // Металургійна теплотехніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України. 2010. С.
11. Пинчук В.А., Губинський М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии// Металургійна техніка: Збірка наукових праць Національної металургійної академії України.-Дніпропетровськ: «Нова ідеологія».-2008.-с. 221-227.