UDC 621.365.5

EFFICIENCY OF APPLYING INDUCTIVE HEATING IN FLUIDIZED BED REACTOR

A.A. Khaydurova, N.S. Kamlenok

Irkutsk State Technical University

The paper introduces the technique of contactless introduction of thermal energy into fluidized bed reactor by electromagnetic field. The authors have studied induction heating of inert conducting particles placing into reactor and being the additional thermal energy source. Heat exchange process in fluidized bed device was studied; the effect of control parameters on the process efficiency was analyzed; the dependences of drying intensification on the variable parameters were determined. The results of the work showed that the technique is characterized by high energy density and flash heat as well as the process high efficiency achieving the value more than 75 %. The technique is notable for availability and design simplicity; it can be applied in various branches of industry. The experiments proved the efficiency of applying induction heating in the proposed drying technique.

Key words:

Drying, inductive heating, fluidized bed, efficiency.

REFERENCES

- 1. Ostrovskogo G.M. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy (New directory of the chemist and technologist. Processes and devices of chemical technologies. P. 2). Saint Petersburg, Professional, 2006. 916 p.
- Kemp I.C. Energy analysis of dryers and its practical application. Proc. of the 17th Int. Drying Symposium. Magdeburg, 2010. pp. 805-813.
- 3. Rudolph M., Schaefer H. *Thermoelectrical method* (Elektrothermische Verfahren). Berlin, Springer-Verlag, 1989. 247 p.
- Osipov Yu.R., Rozhin S.P., Osipov S.Yu., Kutovoy K.V. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta, 2009. 1, pp. 99–106.
- Danilov N.I., Shchelokov Ya.M. Osnovy energosberezheniya (Energy saving ground). Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2006. 564 p.
- Heinrich S. Modeling of the heat and mass transfer as well as particle population in fluidized bed spray granulation (Modellierung des Waerme- und Stoffueberganges sowie der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht-Spruehgranulation). Duesseldorf, VDI-Verlag, 2001. 239 p.

УДК 621.181:519.876

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРА КРУТКИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПКЕ КОТЛА БК3-420-140

А.В. Гиль, А.С. Заворин, А.В. Старченко*, С.В. Обухов**

Томский политехнический университет *Томский государственный университет **Омский филиал ОАО «ТГК-11» E-mail: AndGil@tpu.ru

На основе численного исследования проведен анализ термогазодинамических процессов в топочной камере котла БКЗ-420-140 при различных параметрах крутки топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха. В работе использован Эйлерово−Лагранжев способ описания аэротермохимических процессов в газодисперсных средах, турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «k-ε» модели турбулентности с учетом влияния движущихся частиц. Приведены графические результаты в различных сечениях распространения факелов по ширине топочной камеры, показывающие формирование структуры факела с учетом наличия дисперсной фазы, ее воспламенения и выгорания. Выполнен анализ влияния параметра крутки на образование рециркуляционных внутренних и внешних зон и их термическое воздействие на границы раскручивающегося факела. Получены эффективные значения параметра крутки для сжигания высокозольных экибастузских углей.

Ключевые слова:

Топочная камера, горелочное устройство, параметр крутки, газодинамика, температура, горение угля.

В отечественной энергетике крупные котельные агрегаты используют в основном факельное (камерное) сжигание полифракционного пылеугольного топлива с применением различных видов горелочных устройств и их компоновок. Выбор горелок и схемы сжигания, а вместе с ними и типа топочной камеры, определяется теплотехническими характеристиками проектного топлива из условия его рационального использования.

Специфика теплотехнических свойств угля Экибастузского бассейна состоит в сочетании взрывобезопасности, малой сернистности, хорошей сыпучести и низкой влажности с высокой зольностью, которая составляет в среднем $A^{r}=32,5...41,9$ %. Отмечалось, что с применением на угольных разрезах Экибастузского месторождения сверхмощных роторных экскаваторов предельная зольность выросла до 53% [1]. Наряду с этим в разрабатываемых пластах, вместе с обычными углями, встречаются так называемые «перемятые» угли [2], в которых вследствие разнообразных геологических процессов, происходящих в период углеобразования, аллювиальные отложения равномерно перемешаны с органической массой, что не позволяет отделить минеральную часть даже при тонком размоле.

Изменение состава топлива в таком широком диапазоне негативно отражается на стабильности зажигания топливных частиц, что в совокупности с умеренным выходом летучих ($V^{dal}=25~\%$) обусловило для его эффективного сжигания применение вихревых горелочных устройств со встречной компоновкой. Большое содержание в золе оксида кремния (SiO₂=59...64 %) предопределило ее высокую абразивность, что отразилось на Тобразной компоновке котлов с целью снижения скорости газового потока на выходе из топочной камеры в конвективные газоходы с плотными шагами поверхностей нагрева.

С учетом специфики экибастузских углей для их использования в энергетике отечественным котлостроением создан уникальный типоряд барабанных и прямоточных котельных агрегатов: БКЗ-320-140 и БКЗ-420-140, ПК-39 и ПК-57.

На стадии их внедрения в энергетику были проведены обширные исследования по рациональному сжиганию угля [1, 3, 4 и др.]. В большинстве этих работ основное внимание уделено влиянию тонины помола топлива, избытка и температуры первичного и вторичного воздуха на топочные процессы. Наименее исследованным остается влияние начальных аэродинамических параметров, что объясняется наличием особых трудностей при проведении подобных натурных исследований [5], которые непосредственно отражаются на адекватности получаемых данных. Современное проектирование мощных энергетических котлов, которое не представляется без учета всей полноты газодинамических процессов, актуализирует применение для этого численного моделирования, имеющего в настоящее время высокую степень достоверности [6-8] и лишенного ряда недостатков натурного эксперимента.

Численное исследование проводилось для однобарабанного водотрубного котла БКЗ-420-140 производства Барнаульского котельного завода [9].

Компоновка котлоагрегата выполнена по Т-образной схеме (рис. 1), где топочная камера представляет собой первый восходящий газоход, в опускных газоходах слева и справа от топочной камеры расположены конвективные поверхности пароперегревателя и экономайзер II ступени, а в вынесенной конвективной шахте расположены I ступень экономайзера и I, II ступени воздухоподогревателя.

Топочная камера открытого типа, с твердым шлакоудалением, полностью экранирована трубами $60 \times 5,5$ мм с шагом 64 мм. Боковые экраны в нижней части образуют скаты «холодной воронки». Потолок топки экранирован трубами радиационного пароперегревателя. Объем топочной камеры, составляющий 1957 м³, конструктивно разделен на две части: верхняя в горизонтальном сечении по осям труб противоположных экранов имеет размеры 15744×3776 мм, а нижняя – 15744×9024 мм.

Вихревые (лопаточно-лопаточные) горелки расположены на отметке 10800 мм встречно в один ярус по 6 штук на боковых стенах топки, с чередованием левой и правой крутки потока, что обеспечивает дополнительное перемешивание соседних струй каждой пары горелок. Для растопки котла предусмотрены мазутные форсунки парового распыливания, встроенные в пылеугольные горелки. Диаметр горелок по внешнему каналу подачи вторичного воздуха 1032 мм, а по внутреннему каналу подачи аэросмеси 530 мм. Диаметр мазутной форсунки 218 мм. Расчетные скорости на выходе из горелок: первичного воздуха 20 м/с, вторичного 25,4 м/с.





Рис. 1. Компоновочная схема котла БКЗ-420-140

Топливно-воздушная смесь, попадая в топочное пространство, прогревается как за счет конвекционного теплообмена с потоками внутренней и внешней рециркуляции высокотемпературных топочных газов, так и за счет лучистого теплообмена из топочного пространства и из ядра внутренней зоны рециркуляции. Внутренний эжекционный поток, зарождаясь в глубине горящего факела, приносит высокотемпературные топочные газы к устью горелки и по существу является основным источником подогрева и воспламенения топливновоздушной смеси. При прогреве первичного воздуха происходит с некоторым запаздыванием прогрев топливных частиц и выделение из них летучих веществ. Однако на начальном этапе количество выделившихся летучих и температура среды еще не достаточны для их воспламенения. По мере дальнейшего прогрева частиц и окружающей среды наступают условия, при которых концентрация выделившихся летучих и температура среды оказываются достаточными для их воспламенения. В результате сгорания летучих в условиях конвективного подвода тепла с потоками рециркуляции и лучистой теплоотдачи от окружающего факела температура топливно-воздушной смеси существенно повышается, что приводит к быстрому выходу и сгоранию оставшейся части летучих. В дальнейшем температура частицы должна достигнуть такого уровня, чтобы началось интенсивное горение коксового остатка. При этом очевидно, что роль летучих в процессе зажигания тем меньше, чем меньше их содержится в топливе и чем меньше значение их теплоты сгорания. Поэтому возрастает роль начальных аэродинамических параметров, формирующих факел горелочного устройства.

Таким образом, главной особенностью вихревого сильнозакрученного пылеугольного факела является то, что зажигание аэросмеси в нем происходит в основном благодаря наличию в приосевой области сильноразвитой зоны обратного течения. Поэтому основной характеристикой вихревых горелок является параметр крутки, оказывающий крупномасштабное влияние на поле течения, размеры, форму и устойчивость пламени, а также на интенсивность горения [10].

В качестве исследуемых значений параметров крутки (соответственно для первичного и вторичного воздуха – n_1 , n_2) приняты следующие три варианта: $n_1=0,929$, $n_2=2,22$; $n_1=1,15$, $n_2=3,046$; $n_1=1,642$, $n_2=3,4$. Анализ влияния параметра крутки на топочные процессы проведен с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D [8, 11]. В данном программном продукте теплообмен и горение в газовой фазе представляются на основе Эйлерова способа описания, т. е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлива и золы вдоль их траекторий с

учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду применяется Лагранжев подход. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «k-*ε*» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках Р1 приближения метода сферических гармоник.

Задание граничных условий определяется типом границы. Для входных границ используются известные однородные распределения для всех характеристик. На выходных границах ставятся мягкие граничные условия, причем положение выходных границ в этом случае должно быть достаточно удалено от зон возможной рециркуляции потока. Если течение является симметричным относительно некоторой плоскости, то эта плоскость симметрии выбирается в качестве границы, и на ней задаются условия симметрии (равенство потоков через эту границу и производных по нормали к ней). В качестве граничных условий на стенках топочного объема используются условия прилипания для скорости, граничные условия первого рода для температуры газа, равенство нулю производной по нормали концентраций компонент газа.

При численном расчете топочных процессов размер сетки во всех исследованных вариантах составлял 162504 ячейки, число пробных частиц на этапе Лагранжевого моделирования, зависящее от фракционного состава топлива, учета влияния турбулентных пульсаций и количества ячеек в сечении амбразуры горелки, – 1560 на одну горелку. Критерии сходимости вычисляемого процесса по окончании 650 расчетных итераций имели следующие значения: расхождение скорости – не более 0,018 %, норма невязки уравнений движения не превышает 2,3 %, дисбаланс по общей массе – не более 0,22 %.

На рис. 2 представлены векторные поля газодинамических потоков, распространяющихся в топочном объеме с учетом наличия дисперсной фазы при исследуемых вариантах параметров крутки.

Во всех исследованных вариантах аэродинамическая макроструктура и скоростной режим потоков имеют аналогичный характер. На выходе из горелочных устройств соосные потоки топлива и воздуха распространяются вглубь топочного пространства, потоки перемешиваются между собой и с продуктами горения, движущимися к устью горелки в ее приосевой области.

Истекающие горелочные струи вовлекают в свое движение газ из окружающей среды, в результате чего расход в них увеличивается. При распространении по топочному объему горелочные струи соударяются, и в месте соударения в результате торможения динамический напор трансформируется в статическое давление. Под действием образовавшегося перепада давления общий поток растекается вверх и вниз с образованием ниже оси горелочных устройств мощных вихрей, размеры



Рис. 2. Аэродинамическая структура потока в топке в вертикальном сечении по оси горелок при различных параметрах крутки: a) n₁=0,929, n₂=2,22; б) n₁=1,15, n₂=3,046; в) n₁=1,642, n₂=3,4

которых возрастают с увеличением значения параметра крутки.

На небольшом удалении от устья горелок (рис. 3, а) отчетливо прослеживается структура сильно закрученных соосных струй при истечении из горелочных устройств. В центральных и периферийных областях струй наблюдаются рециркуляционные зоны продуктов сгорания, при этом зоны в приосевом пространстве увеличиваются при удалении от устья горелок (рис. 3, б, в). При этом с увеличением параметра крутки возрастают значения скоростей в зонах эжекции, но снижается плотность скоростного потока в направлении распространения горелочных струй. Из рис. 3 видно, что во всех вариантах потоки, истекающие из горелок, на удалении 1000 мм от устья являются сильнозакрученными и имеют аэродинамические условия, достаточные для устойчивого внутреннего зажигания пылеугольного факела.

Для графического представления других топочных параметров использованы информационные срезы для горизонтального сечения на расстоянии 650 мм от устья горелок, хотя анализ соответствующих процессов выполнен по всему объему полученных результатов.

Согласно распределению температуры, концентрации летучих, CO_2 , O_2 (рис. 4) вихревой факел можно условно разделить на два участка: внутренний (внутри зоны раскрытия струи) и наружный с границей по кольцевой области, в которой имеют место минимальные значения температуры и концентрации CO_2 , максимум концентрации летучих и O_2 . Поскольку в центральной части внутренней зоны концентрация CO_2 составляет 10...13 %, то можно считать, что массы топочных газов внутренней и внешней рециркуляции активно вовлекаются в структуру факела, интенсифицируя конвективный теплообмен.

В соответствии с эффективностью зажигания и выгорания топлива в непосредственной близости от границ зон рециркуляции частицы находятся в наиболее благоприятных условиях. В более худших условиях оказываются частицы, распространяющиеся в слое с максимальной скоростью и концентрацией частиц, в который не проникают высокотемпературные эжекционные потоки. Но поскольку в данной области движется основная масса угольных частиц, прогревом именно этих слоев определяется скорость распространения пламени по всему поперечному сечению топливно-воздушной смеси. Поэтому необходимо обеспечение температурного уровня, достаточного для выделения и воспламенения летучих на внешней границе зоны рециркуляции. По всем вариантным исследованиям при параметрах крутки n₁=0,929, $n_2 = 2,22$ температура газов (рис. 4, б) не обеспечивает быстрый прогрев и воспламенение, что отражается на более высокой концентрации летучих и кислорода (рис. 4, *a*, *г*). Прогрев и воспламенение факела в данном случае происходит за счет внешней рециркуляции (рис. 3 и 4, б).

При увеличении крутки до $n_1=1,15$, $n_2=3,046$ и $n_1=1,642$, $n_2=3,4$ зона внутренней рециркуляции достаточна для воспламенения и проникновение пламени в поперечных снесениях струи происходит как с внутреннй, так и с внешней зоны рециркуляции.

На рис. 5 представлено изменение температуры и концентрации кислорода по высоте топочной камеры при исследуемых параметрах крутки. Со-







Рис. 4. Распределение параметров топочной среды в горизонтальном сечении по оси горелочных устройств: а) концентрация летучих; б) температура; в) концентрация CO_2 ; г) концентрация O_2 ; - $n_1=0,929$, $n_2=2,22$; - $n_1=1,15$, $n_2=3,046$; - $n_1=1,642$, $n_2=3,4$



Рис. 5. Изменение максимальных значений температуры (a) и среднеинтегральной концентрации O_2 (б) по высоте топки: $- n_1 = 0,929, n_2 = 2,22; - n_1 = 1,15, n_2 = 3,046; - n_1 = 1,642, n_2 = 3,4; - экспериментальные значения$

гласно этим результатам при параметрах крутки $n_1=0,929$, $n_2=2,22$ процесс воспламенения и выгорания топливно-воздушной смеси проходит неполно, что отразится на увеличении потерь с механическим и химическим недожогом топлива. Остальные исследованные варианты отличаются между собой незначительно и только до высоты 12 м.

Результаты численного эксперимента имеют хорошее согласование с экспериментальными данными, что свидетельствует об их адекватности (рис. 5, *a*). Имеющиеся расхождения в результатах натурного и численного исследования можно отнести к недостаточной дискретизации исследуемого объекта [12], однако повышение дискретизации приводит к существенному увеличению расчетного времени.

На основании проведенного исследования установлено, что при крутке горелочной струи с параметрами $n_1=0,929, n_2=2,22$ воспламенение топлив-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Резняков А.Б., Бухман С.В., Вдовенко М.И., Курмангалиев М.Р., Палатник И.Б. Свойства экибастузских углей, их сжигание и поведение минеральной части в котельных агрегатах // Теплоэнергетика. – 1974. – № 1. – С. 5–7.
- Резняков А.Б. Горение пылеугольного факела. Алма-Ата: АНКазССР, 1958. – 198 с.
- Ослопов О.И., Карасина Э.С. Исследование теплообмена в топке котла БКЗ-320 при сжигании экибастузского угля // Теплоэнергетика. – 1973. – № 4. – С. 72–75.
- Гончаров А.И., Маршак Ю.Л., Карасина Э.С., Ефименко Л.Н. Исследование теплообмена в топке котла БКЗ-420 с двухпо-

но-воздушной смеси зависит от внешней рециркуляционной зоны. С увеличением параметров крутки усиливается влияние приосевой зоны обратного тока, что способствует воспламенению топливновоздушной смеси на более ранних стадиях и более полному выгоранию топлива.

В итоге можно заключить, что для обеспечения эффективного воспламенения и выгорания экибастузских улей целесообразно использовать вихревые горелочные устройства с параметрами крутки лопаточных аппаратов: 1,15 по первичному воздуху и 3,1 по вторичному воздуху.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1496 «Разработка технологии практической оценки эффективного использования непроектных органических топлив в пылеугольных камерах сгорания энергогенерирующих установок на основе численного решения и анализа физико-химических процессов горения».

точными вихревыми горелками при сжигании экибастузского угля // Теплоэнергетика. – 1974. – № 8. – С. 77–80.

- Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо. – Томск: STT, 2011. – 184 с.
- Grace J.R., Cui H., Elnashaie S.S. Non-uniform distribution of two-phase flows through parallel identical paths // Can. J. Chem. Eng. - 2007. - V. 85. - P. 662-668.
- Wang J., Ge W., Li J. Eulerian simulation of heterogeneous gas-solid flows in CFB risers: EMMS-based sub-grid scale model with a revised cluster description // Chem. Eng. Sci. - 2008. -V. 63. - P. 1553-1571.

- Гиль А.В., Старченко А.С. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 655–671.
- Котельные агрегаты большой мощности: каталог-справочник 18-6-74 / Научно-исследовательский институт экономики, организации производства и технико-экономической информации в энергетическом машиностроении (НИИЭИНФОР-МЭНЕРГОМАШ). – М.: Нииинформтяжмаш, 1975. – 116 с.
- Гупта А.К., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / пер. с англ.; под ред. С.Ю. Крашенинникова. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
- Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакования в пылеугольных топках // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.
- Гиль А.В. Влияние дискретизации расчетной области топочной камеры на результаты численных исследований // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Издво ТПУ, 2012. – С. 179–182.

Поступила 01.09.2013 г.

UDC 621.181:519.876

NUMERICAL INVESTIGATION OF A BURNER TWIST PARAMETER EFFECT ON THERMOGAS DYNAMIC PROCESSES IN BOILERS BKZ-420-140

A.V. Gil, A.S. Zavorin, A.V. Starchenko*, S.V. Obukhov**

Tomsk Polytechnic University *Tomsk State University **Omsk branch of «TGC-11»

Based on numerical study the authors have analyzed thermogas dynamic processes in BKZ-420-140 combustion chamber at different twist parameters of fuel-air mixture and secondary air. The authors used the Euler-Lagrange aerothermochemistry way to describe processes in gas-dispersed environments; gas turbulent characteristics are calculated using a two-parameter «k- ϵ » turbulence model considering moving particles effect. The paper introduces graphic results in different sections of flames spread across the combustion chamber width showing flame formation structure with dispersed phase, its ignition and combustion. The authors analyzed twist parameter effect on formation of internal and external recirculation zones and their thermal action on twisting torch boundaries. The effective values of the twist parameter for burning high-ash Ekibastuz coals were obtained.

Key words:

Combustion chamber, burner device, twist parameter, gas dynamics, temperature, combustion of coal.

REFERENCES

- Reznyakov A.B., Bukhman S.V., Vdovenko M.I., Kurmangaliev M.R., Palatnik I.B. *Teploenergetika*, 1974. 1, pp. 5–7.
- Reznyakov A.B. Gorenie pyleugol'nogo fakela (Coal-dust flame combustion). Alma-Ata, ANKazSSR, 1958. 198 p.
- 3. Oslopov O.I., Karasina E.S. Teploenergetika, 1973. 4, pp. 72-75.
- Goncharov A.I., Marshak Yu.L., Karasina E.S., Efimenko L.N. Teplojenergetika, 1974. 8, pp. 77–80.
- Gil A.V., Starchenko A.V., Zavorin A.S. Primenenie chislennogo modelirovaniya topochnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoe toplivo (Application of numerical simulation burning process for boiler conversion to). Tomsk, STT, 2011. 184 p.
- Grace J.R., Cui H., Elnashaie S.S. Non-uniform distribution of two-phase flows through parallel identical paths. *Can. J. Chem. Eng.*, 2007. 85, pp. 662–668.

- Wang J., Ge W., Li J. Eulerian simulation of heterogeneous gas-solid flows in CFB risers: EMMS-based sub-grid scale model with a revised cluster description. *Chem. Eng. Sci.*, 2008. 63, pp. 1553-1571.
- Gil' A.V., Starchenko A.S. Teplofizika i aeromekhanika, 2012. 19, 5, pp. 655-671.
- Kotelnye agregaty bolshoy moshchnosti: katalog-spravochnik 18-6-74 (High capacity boiler units: catalogue 18-6-74). Moscow, Niiinformtyazhmash, 1975. 116 p.
- Gupta A.K., Lilli D., Sayred N. Zakruchennye potoki (Swirl flows). Moscow, Mir, 1987. 588 p.
- Starchenko A.V., Zavorin A.S., Krasilnikov S.V. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2002. 305, 2, pp. 152–157.
- Gil A.V. Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy. Tomsk, TPU, 2012. pp. 179-182.