

УДК: 537.526.533.9:662.61

АСКАРОВА А.С., МЕССЕРЛЕ В.Е., НАГИБИН А.О., УСТИМЕНКО А.Б.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-75, ОСНАЩЕННОГО ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНЫМИ СИСТЕМАМИ

Представлены результаты сравнительных численных расчетов процессов традиционного сжигания угля и с плазменной активацией горения в топочном пространстве. Расчеты проводились с использованием двух компьютерных программ: одномерной – “Плазма-Уголь”, учитывающей детальную кинетику термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником, и трехмерной – “Cinar ICE”, учитывающей геометрию топки, турбулентность среды, радиационный теплообмен и процесс горения угольных частиц по модели быстрой кинетики. Показана перспективность применения плазменно-топливных систем для активации горения угля и улучшения эколого-экономических показателей тепловых электростанций на примере топки котла БКЗ-75.

В последнее время переориентация топливного баланса с газообразных и жидким топливом на твердые – является мировой тенденцией, в полной мере присущей Казахстану, где доля пылеугольных тепловых электростанций (ТЭС) составляет около 80 %. В этой связи исследование процессов, протекающих при горении пылеугольного факела в топках котлов ТЭС (рис. 1) является одной из наиболее актуальных проблем современной теплофизики [1].

Для повышения эффективности использования твердых топлив, снижения доли мазута и природного газа в топливном балансе ТЭС и снижения вредных пылегазовых выбросов была разработана плазменная технология воспламенения углей, основанная на их электротермохимической подготовке к сжиганию (ЭТХПТ) [2, 3]. ЭТХПТ реализуется на ТЭС с использованием плазменно-топливных систем (ПТС). Согласно этой технологии мазут или природный газ, традиционно используемые для растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела, заменяют угольной пылью, подвергаемой ЭТХПТ в объеме пылеугольной горелки с использованием электродуговых плазмотронов, являющихся основным элементом ПТС (рис. 2). Технология ЭТХПТ заключается в нагреве аэросмеси 4 (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой от плазмотрона 2 до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксово-го остатка. Тем самым из исходного угля полу-

чают высокореакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток). При его смешении с вторичным воздухом в топке котла 1 двухкомпонентное топливо воспламеняется и устойчиво горит без дополнительного топлива (мазут или природный газ). ПТС компонуется с традиционной пылеугольной горелкой путем замещения ее частей 1-3 (рис. 3).

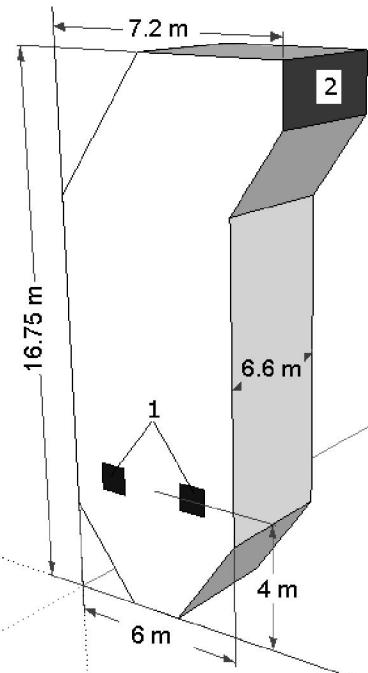


Рис. 1. Общий вид топки котла БКЗ-75-39ФБ:
1 – амбразуры для установки пылеугольных горелок,
2 – сечение поворотной камеры котла.

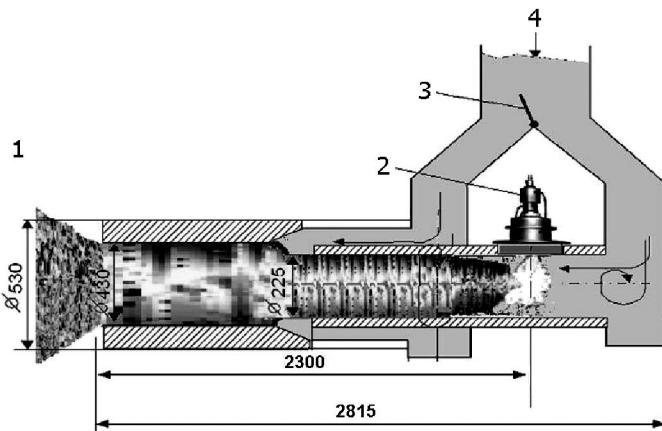


Рис.2. Общий вид двухступенчатой ПТС: 1 – топочное пространство, 2 – плазмотрон, 3 – регулирующий шибер, 4 – подача аэросмеси

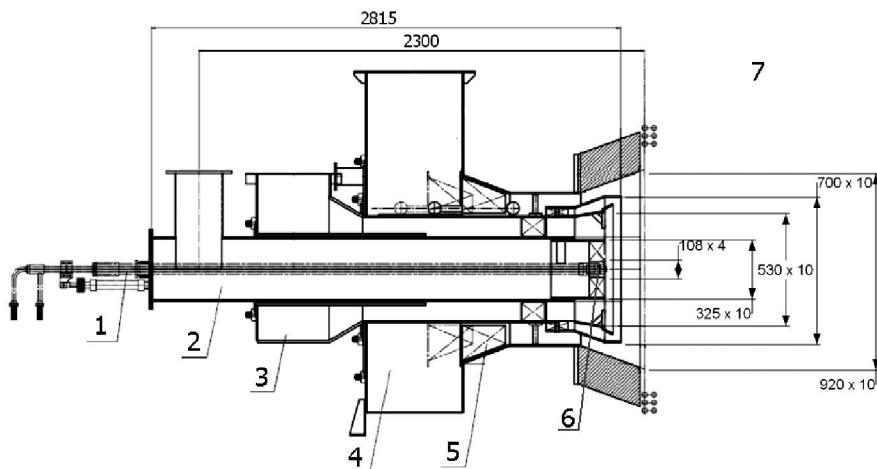


Рис. 3. Общий вид вихревой горелки для традиционного сжигания угля: 1 – мазутопровод, 2 – воздух для сжигания мазута, 3 – короб аэросмеси, 4 – короб вторичного воздуха, 5 – лопаточный аппарат, 6 – мазутная форсунка, 7 – топочное пространство

К настоящему времени среди методов моделирования горения топлива (газообразного, распыленной жидкости и пылеугольного) наибольшее распространение получил метод, в основе которого лежит эйлеров подход для описания движения и тепломассообмена газовой фазы. Этот метод использует пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергий для газовой смеси, и лагранжев подход для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлив вдоль их траекторий [4-8]. Тurbулентная структура потока описывается двухпараметрической $k - \varepsilon$ моделью турбулентности [4]. Радиационный теплообмен представляется либо шестипоточной

моделью [5], либо моделью дискретного переноса [6].

Настоящая статья посвящена численному исследованию влияния внутреннего теплового источника на термохимические превращения топливной смеси и ее горение на примере сжигания каменного энергетического угля в топке котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭС (рис. 1). Таким образом, в задачу исследований входил расчет процессов горения в топке котла, оснащенного традиционными пылеугольными горелками с мазутной форсункой (рис. 3) и плазменно-топливными системами с плазмотроном (рис. 2). Для численных исследований были выбраны два режима работы котла: традиционный (с использованием

четырех пылеугольных горелок) и с плазменной активацией горения (с заменой двух пылеугольных горелок на плазменно-топливные системы). Для расчетов использовались две компьютерные программы: одномерная – “Плазма-Уголь”, учитывающая детальный механизм кинетики термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником, и трехмерная – “Cinar ICE”, учитывающая реальную геометрию топки и кинетику процесса горения угольных частиц по упрощенной кинетической схеме. Параметры двухкомпонентного высокореакционного топлива (синтез-газа и коксового остатка) из аэросмеси, получаемого в ПТС (рис. 2), рассчитывались с использованием программы Плазма-Уголь. Они являлись начальными параметрами для трехмерного расчета топки котла БКЗ-75 (Рис. 1), оснащенного ПТС, которые выполнялись по трехмерной модели Cinar ICE. Эта же программа использовалась и для расчетов режима сжигания угля в топке котла БКЗ-75, оснащенного обычными вихревыми пылеугольными горелками.

Математическая модель процесса ЭТХПТ описывает двухфазный (угольные частицы + газ-окислитель) химически реагирующий поток, распространяющийся в камере с внутренним источником тепла (электрическая дуга или плазменная струя от плазмотрона). Частицы и газ поступают в камеру с одинаковыми температурами, между частицами, газом и внутренним источником тепла имеет место тепломассообмен. Также учитываются обмен теплом и импульсом между потоком и стенкой камеры и следующие химические превращения топлива: выделение летучих продуктов из угольных частиц, превращения летучих в газовой фазе и газификация коксового остатка.

Для математического описания процесса ЭТХПТ были приняты следующие основные допущения [9, 10]. Предполагается, что процесс одномерный и стационарный. Процессы плазменной термохимической переработки углей обычно осуществляются при атмосферном давлении и температурах 1500-3000 К. При этом поток газа, как правило, сильно турбулизирован и распределения температур, скоростей и концентраций компонентов по радиусу камеры практически равномерны, а изменение этих параметров наблюдается только по оси камеры. Также в

модели допускается отсутствие взаимодействия частиц между собой и их изотермичность, а на входе в камеру плазменной активации смесь газа и частиц предполагается однородной.

Сделанные допущения позволяют ограничиться системой обыкновенных дифференциальных уравнений, что существенно упрощает численные расчеты.

Электрическая дуга или плазменный факел учитывались в уравнении сохранения энергии как внутренний источник тепла с эмпирически задаваемым распределением тепловыделения по оси камеры ЭТХПТ.

В общем случае модель учитывает полидисперсность угольной пыли, которая отражалась разделением ее на ряд представительных фракций, в каждой из которых размер частицы усреднялся таким образом, чтобы поверхность частиц среднего размера равнялась суммарной поверхности частиц данной фракции. После разделения полидисперсных угольных частиц на фракции производился расчет их движения, нагрева и газификации при одновременном участии в процессе частиц различных фракций.

Программа Cinar ICE (Cinar Integrated CFD Environment), разработанная в «Империал Колледж Лондон» [7, 11, 12], представляет собой программный комплекс для физического моделирования и расчета гидродинамики, тепломассообмена и горения топлив в трехмерном пространстве топочных устройств. Сложные физические и химические процессы протекающие при горении газа, твердого или жидкого топлива, описываются уравнениями сохранения, включающими уравнения сохранения массы, сохранения момента количества движения и энергии для газовой и твердой фаз. Динамика газа рассматривается в Эйлеровой системе [13, 14], а динамика твердых частиц – в Лагранжевой системе. Для исследования турбулентного горящего потока используются осредненные по Фавору уравнения сохранения, дополненные двухпараметрической $k - \varepsilon$ моделью турбулентности, используется модель быстрой кинетики протекающих при горении химических реакций, базирующаяся на концепции горения многофракционных смесей [4]. Для учета радиационного теплообмена используется шестипоточная модель излучения и перенесения частиц [5]. Дискретизация исходных уравнений осуществляется методом контрольно-

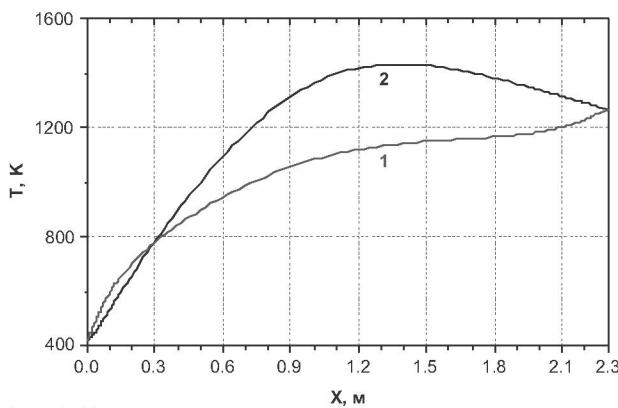


Рис. 4. Изменение температуры (T) газа и частиц по длине ПТС (X): 1 - газ, 2 - частицы

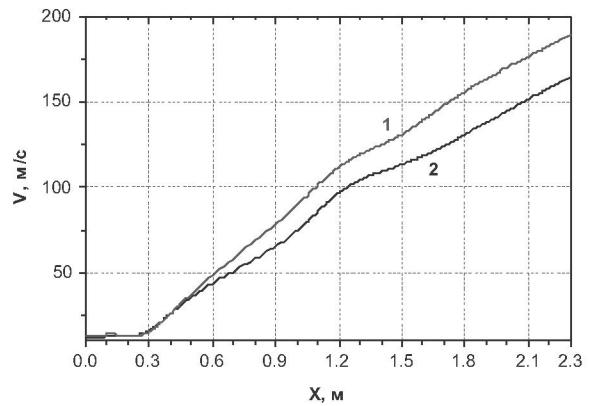


Рис. 5. Изменение скорости (V) газа и частиц по длине ПТС (X): 1 - газ, 2 - частицы

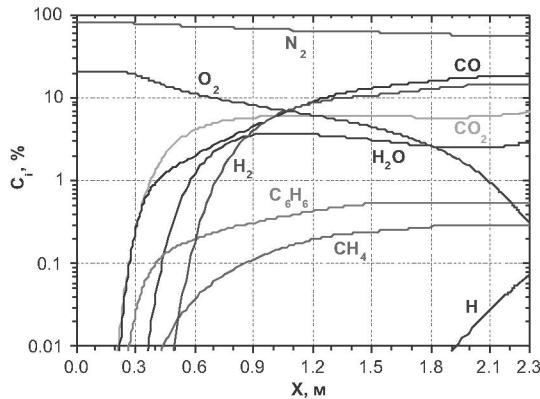


Рис. 6. Изменение концентраций компонентов газовой фазы (C_i) по длине ПТС (X)

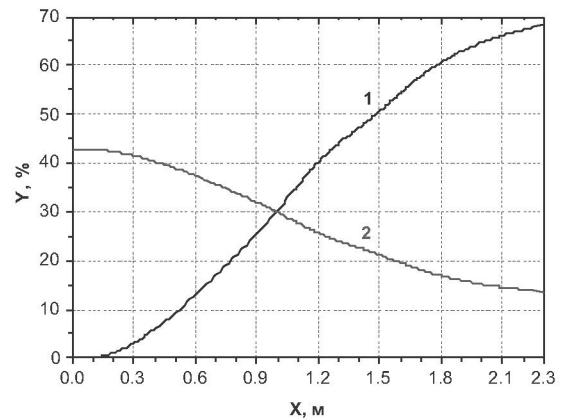


Рис. 7. Изменение степени газификации и концентрации углерода в коксовом остатке (Y) по длине ПТС (X): 1 – степень газификации углерода, 2 – концентрация углерода

го объема. Для расчета поля давлений используется алгоритм SIMPLE [13, 4]. Динамика газовой фазы описывается уравнениями неразрывности, движения, энталпии смеси для турбулентного потока и уравнением смешения для присутствующих компонентов смеси.

Котел БКЗ-75-39ФБ оборудован четырьмя аксиально-лопаточными вихревыми пылеугольными горелками (рис. 3), установленными по две

горелки с фронта и с тыла в один ярус (рис. 1). В котле сжигается пыль Карагандинского рядового (КР-200) угля, зольностью 35,1%, выходом летучих 22%, влажностью 10,6% и теплотой сгорания 18550 кДж/кг. Тонина помола угля составляет $R_{90}=20\%$. Исходные данные для расчета ПТС по программе Плазма-Уголь приведены в таблице 1. В результате расчета были получены следующие характеристики процесса ЭТХПТ:

Таблица 1. Исходные данные для расчета ПТС

| Параметр | | | | | | | | Значение |
|---|------|----------------|------------------|-----|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------|
| Мощность плазмотрона, кВт | | | | | | | | 200 |
| Начальная температура аэросмеси, К | | | | | | | | 418 |
| Расход угля через горелку или ПТС, кг/час | | | | | | | | 3200 |
| Расход первичного воздуха, кг/час | | | | | | | | 6400 |
| Длина ПТС, м | | | | | | | | 2.3 |
| Задаваемый в программе Плазма-Уголь состав угольной пыли, масс. % | | | | | | | | |
| Зола | C | H ₂ | H ₂ O | CO | CO ₂ | CH ₄ | C ₆ H ₆ | |
| 35.1 | 42.9 | 3.18 | 1.1 | 9.5 | 3.38 | 0.66 | 4.18 | |

распределения температур (рис. 4) и скоростей (рис. 5) газа и частиц, концентраций компонентов газовой фазы (рис. 6), степени газификации и концентрации углерода в коксовом остатке (рис. 7).

Из рис. 4 видно, что на начальном участке камеры ЭТХПТ ($X < 0.3$ м) температура газа превышает температуру частиц за счет первоначального теплообмена плазменного источника с газовой фазой. При этом скорости газа и частиц не увеличиваются, практически не различаясь между собой (рис. 5). В дальнейшем из нагретых угольных частиц наблюдается выделение летучих (рис. 6) с одновременной газификацией углерода коксового остатка (рис. 7). За счет окисления углерода на поверхности частиц их температура повышается до 1450 К, превышая температуру газа на 350 градусов ($X = 1.2$ м). На выходе камеры ЭТХПТ между газом и частицами достигается термическое равновесие при температуре 1270 К, а скорость газового потока достигает 189 м/с, превышая скорость частиц на 25 м/с. Отметим, скорость потока на выходе из ПТС многократно превышает скорость аэросмеси на выходе традиционных пылеугольных горелок. Концентрации горючих компонентов (CO , H_2 , H , CH_4 , C_6H_6) возрастают по длине ПТС, достигая своего максимума (33.5 %) на выходе ПТС. При этом концентрация окислителей (CO_2 , H_2O , O_2) на выходе ПТС не превышают 10 %. Концентрация инертного газа (N_2) по длине ПТС изменяется от 78 до 56.4 % на выходе. Степень газификации углерода по длине камеры ЭТХПТ увеличивается, достигая на выходе 68 %. Такой степени

газификации вполне достаточно для получения высокореакционного двухкомпонентного топлива, интенсивно воспламеняющегося при смешении с вторичным воздухом в топочном пространстве.

Полученные интегральные характеристики процесса ЭТХПТ на выходе ПТС (таблица 2) использовались в качестве начальных параметров при трехмерном численном моделировании горения электротермохимически подготовленного к сжиганию топлива в топке энергетического котла БКЗ-75-39ФБ с использованием программы Cinar ICE. Исходный состав угля КР-200 и состав коксового остатка после ЭТХПТ приведены в таблице 3. Теплота сгорания коксового остатка составила 8580 кДж/кг.

Численный расчет топочной камеры котла БКЗ-75-39ФБ, схематически изображенного на рис. 1, в случае традиционного сжигания угля и в случае сжигания угля при использовании 2 ПТС, выполнялся с использованием программы Cinar ICE. Исходные данные для трехмерных численных исследований режимов работы топки котла приведены в таблице 4.

Результаты расчета топки по программе Cinar ICE приведены на рис. 8 – 13. Рис. 8 и 9 наглядно демонстрируют разницу полей температуры в двух режимах сжигания угля в топке котла, традиционном (рис. 8) и с предварительной плазменной активацией аэросмеси в двух ПТС (рис. 9). При традиционном сжигании угля четыре симметричных факела с максимальной температурой 1852°C образуют в центральной области топки общее ядро факела с температу-

Таблица 2. Состав продуктов ЭТХПТ на выходе ПТС

| Состав газовой фазы (об.% и кг/ч) | | | | | | | Зола, кг/ч | C , кг/ч |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| H ₂ 14.2 88.5 | CO 18.4 1599.0 | CH ₄ 0.3 14.0 | C ₆ H ₆ 0.6 133.8 | CO ₂ 6.8 931.2 | H ₂ O 2.9 162.8 | N ₂ 56.4 4911 | O ₂ 0.3 31.0 | 1123.2 435.0 |
| Температура газа (К) 1270 | | | | Температура частиц (К) 1270 | | | Скорость потока (м/с) 189 | |

Таблица 3. Составы угля и коксового остатка, массовые %

| C _{твердый} | C _{летучий} | H | O | S | N | H ₂ O | Зола |
|----------------------|----------------------|------|------|------|------|------------------|------|
| Исходный уголь | | | | | | | |
| 21.21 | 22 | 3.6 | 5.24 | 1.04 | 1.21 | 10.6 | 35.1 |
| Коксовый остаток | | | | | | | |
| 10.33 | 10.71 | 1.75 | 2.55 | 0.51 | 0.59 | 5.16 | 68.4 |

Таблица 4. Исходные данные для трехмерных численных исследований топки котла

| Характеристика Количество и тип горелок, шт | Традиционный режим 4 пылеугольные аксиально-лопаточные вихревые | Режим с ПТС 2 пылеугольные аксиально- лопаточные вихревые и 2 двухступенчатые ПТС |
|---|--|--|
| Производительность одной горелки по топливу, кг/ч | 3200 | 3200 |
| Расход первичного воздуха на котел, кг/ч | 41040 | 28233 |
| Расход вторичного воздуха на котел, кг/ч | 78163 | 78163 |
| Температура воздуха, °С | 290 | 290 |
| Расход коксового остатка после ПТС на котел, кг/ч | | 3305 |
| Расход газообразных продуктов ЭТХПТ, кг/ч | | 18670 |
| Средний размер частиц, мкм | 75 | 75 |
| Плотность угля, кг/м³ | 1300 | 1300 |
| Размер расчетной сетки | 85 X 69 X 116 | 85 X 69 X 116 |

рой около 1300°С. На рис. 9 ПТС расположены сверху (поперечное сечение топки) и справа (продольное сечение топки). Влияние ПТС проявляется в изменении формы факела высокореакционного двухкомпонентного топлива, увеличении его длины и повышении максимальной температуры до 2102°С.

Как видно из рис. 10 температурные кривые имеют характерный максимум в зоне расположения горелок на высоте 4 м. При традиционном режиме горения уровень среднемассовых температур в топке на высоте до 6 м выше такового

при работе котла в режиме с использованием ПТС. Разница температур достигает 75 градусов ($2 < H < 3$ м), что объясняется более интенсивным излучением от угольных частиц, имеющих более высокую концентрацию и суммарную поверхность при традиционном сжигании, по сравнению с режимом использования ПТС. В последнем случае из ПТС в топочное пространство поступает двухкомпонентное топливо, состоящее из горючего газа и частиц коксового остатка, масса которого не превышает 30% от расхода исходного угля, что приводит к трехкратному



Рис. 8. Поле температур в поперечном сечении топки на уровне расположения горелок при традиционном режиме горения



Рис. 9. Поле температур в поперечном (слева) и продольном (справа) сечениях топки в плоскости расположения горелок и ПТС при сжигании угля с использованием двух ПТС

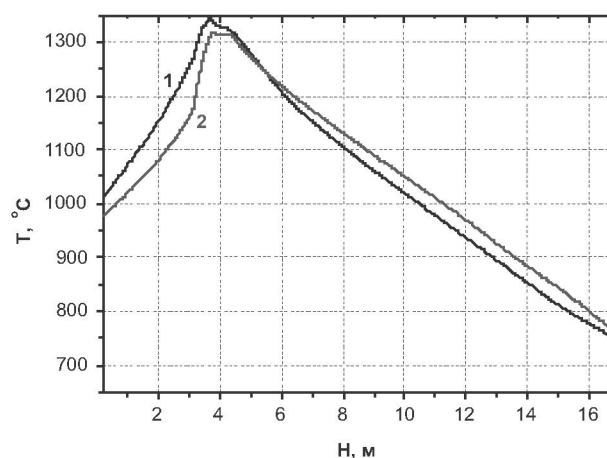


Рис. 10. Распределение среднемассовой температуры (T) по высоте котла (H).

1 – традиционное сжигание угля,
2 – сжигание угля в топке, оснащенной 2 ПТС

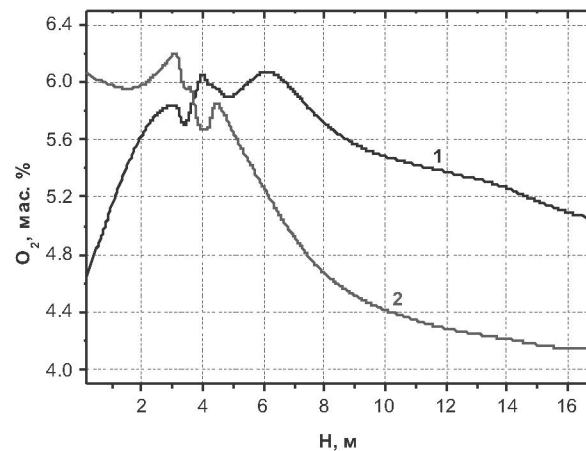


Рис. 11. Распределение среднемассовой концентрации кислорода по высоте котла (H).

1 – традиционное сжигание угля,
2 – сжигание угля в топке, оснащенной 2 ПТС

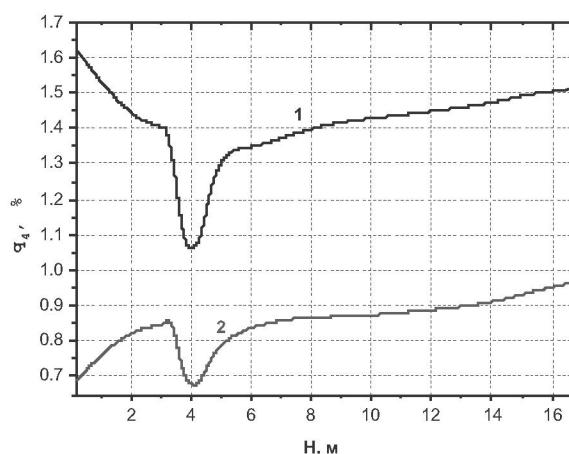


Рис. 12. Распределение средних значений мехнедожога (q_4) по высоте котла (H).

1 – традиционное сжигание угля,
2 – сжигание угля в топке, оснащенной 2 ПТС

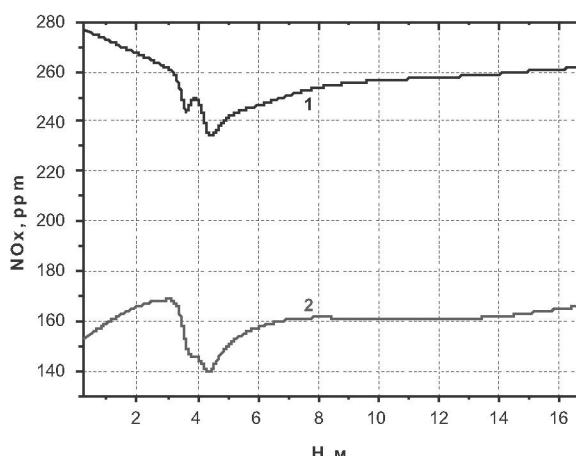


Рис. 13. Распределение среднемассовой концентрации NO_x по высоте котла (H).

1 – традиционное сжигание угля,
2 – сжигание угля в топке, оснащенной 2 ПТС

снижению суммарной поверхности излучающих частиц. Далее, на участке $5.5 < H < 16.75$ м температура в режиме с плазменной активацией горения выше таковой при традиционном горении на 30 градусов. Это объясняется более полным выгоранием топлива (рис. 12) при плазменной активации его горения, подтверждаемым снижением концентрации кислорода в топке на этом же участке (рис. 11). Отметим, что значение механического недожога топлива, характеризующего полноту выгорания углерода угля, на выходе из топки ($H=16.75$ м) при использовании двух ПТС в 1.5 раза ниже, чем при традиционном сжига-

нии. ПТС также улучшает экологические характеристики процесса сжигания твердого топлива, что следует из рис. 13, демонстрирующего снижение выбросов оксидов азота более, чем в 1.5 раза. Очевидно, что снижение мехнедожога (Рис. 12) и снижение оксидов азота NO_x (Рис. 13) на выходе из топки котла при использовании ПТС повышает эколого-экономические показатели ТЭС.

В заключение отметим, что для исследования были использованы две компьютерные численные модели, реализованные в виде научных программных продуктов, Плазма-Уголь и Cinag

ICE. Использование этих программ позволило детально исследовать процессы горения угля с использованием электротермохимической подготовки его к сжиганию. Плазменная активация горения угля повышает эффективность его сжигания, снижая механический недожог топлива и выбросы оксидов азота [15]. Одновременное использование двух программ позволило провести комплексное численное исследование промышленного пылеугольного котла, что в дальнейшем позволит сопоставить полученные результаты с данными планируемых натурных экспериментов на этом же котле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.А. Проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса России // Энергоэффективность: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции (6-8 октября 2008г., Киев, Украина). – Киев: Институт газа НАНУ, 2008. С. 7-10.
2. Карпенко Е.И., Мессерле Б.Е. Плазменно-энергетические технологии топливо-использования. Новосибирск, Наука, 1998 Том 1. С. 1-384.
3. Аскарова А.С., Карпенко Е.И., Мессерле Б.Е., Устименко А.Б. Плазмохимическая активация горения твердых топлив. Химия высоких энергий 2006. том 40. № 2. С. 141-148.
4. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Meth in Appl. Mech. And Eng. 1974. V.3. N2. P. 269-289.
5. Lockwood F.C., Shan N.G. Evaluation of an efficient radiation flux model for furnace prediction procedures // Proc. Sixth Intern. Heat Transfer Conference. 1978. P. 1405-1413.
6. Lockwood F.C., Shan N.G. A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Proc. 18th Intern. Symp. On Combustion. Pittsburgh. The Combustion Inst., 1981. P. 1405-1413.
7. Lockwood F.C., Salooja A.P., Syed A.A. A prediction method for coal-fired furnaces // Combust. Flame. 1980. V.38. N1. P.1-15.
8. Бурдуков А.П., Попов В.И., Фалеев В.А., Мессерле Б.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б. Исследование горения углей микропомола / Материалы конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». Алушта 2004 г.
9. Goal A., Gidaspow D. Modelling of Entrained Flow in Coal Hydrolysis Reactors. 1. Mathematical Formulation and Experimental Verification. 2. Reactor design. // Ind. and Eng. Chem. Process Des. and Develop. 1982. Vol.21. P. 611-632.
10. Kalinenko R.A., Kuznetsov A.P., Levitsky A.A., Messerle V.E., Mirokhin Yu.A., Polak L.S., Sakipov Z.B., Ustimenko A.B. Pulverized Coal Plasma Gasification // Plasma Chemistry & Plasma Processing. 1993. Vol.13. N 1. P. 141-167.
11. Lockwood F.C., Mahmud T., Yehia M.A. Simulation of pulverised coal test furnace performance // Fuel 77. №12. 1998. P. 1329.
12. Lockwood F.C. and Mahmud T. // The Prediction of Swirl Burner Pulverised Coal Flames // Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1988. P. 165.
13. Старченко А.В. Математическое моделирование образования оксидов азота при горении пылеугольного топлива // Физика горения и взрыва. 1998. Т.34. №6. С. 3-13.
14. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Атомиздат. 1984. 152 с.
15. Мессерле Б.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б. Образование оксидов азота при плазмохимической подготовке Экибастузского угля к сжиганию. // III международный симпозиум “Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия”. Алматы, 2004. С. 221 – 224.

Резюме

Көмірдің дәстүрлі жануының және оттық қеністігінде плазмалық активациясымен жанатын үрдістерінің салыстырмалы сандық есептердің нәтижелері көрсетілген. Есептер екі компьютерлік бағдарламалармен жүргізілген: екі фазалық ағында плазмалық көзімен бірге отын термохимиялық айналуын бөлшек кинетикасын ескере алатын бір елшемдік – «Плазма-Көмір» және оттықтың геометриясын, қеністіктің турбуленттілігін, радиациялық жылу алмасуын және көмірдің бөлшектерінің жедел кинетика моделі бойынша жануын ескере алатын үш елшемдік – «Cinar ICE». Көмір жануының активтенуі және жылу электр стансасының экологиялық-экономикалық көрсеткіштерін жақсарту үшін (БКЗ-75 қазандықтың оттықтың үлгісінде) плазмалық-отындық жүйесін қолданудың болашағы көрсетілген.

Summary

Results of comparative numerical calculations of conventional combustion of coal and combustion of plasma activated in plasma-fuel systems coal in a furnace are presented. The calculations were fulfilled using two computer codes. The first one is one-dimensional Plasma-Coal code considering detail kinetics of thermochemical conversions of fuel in two-phase flow with plasma source and the second one is Cinar ICE code considering furnace geometry, flow turbulence, radiative heat transfer and combustion of coal particles by the fast chemistry model. Perspective of plasma-fuel systems to activate coal combustion and to improve ecology and economical indexes of thermal power plants is demonstrated by the example of the furnace of BKZ-75 boiler.