

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ ГОРЕНИЯ ФАКЕЛА В ТОПКЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

В.Е. Мессерле¹, А.Б. Устименко², А.С. Аскарлова², А.О. Нагибин²

¹Институт проблем горения, ²Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, г.Алматы

Представлены результаты сравнительных численных расчетов процессов традиционного сжигания угля и с плазмохимической 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 (ТЭС).

В последнее время переориентация топливного баланса с газообразных и жидких топлив на твердые – является мировой тенденцией. В этой связи исследование процессов, протекающих при горении пылеугольного факела в топках котлов ТЭС (рис. 1), является одной из наиболее актуальных проблем современной теплоэнергетики. 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) [1, 2]. ЭТХПТ реализуется на ТЭС с использованием плазменно-топливных систем (ПТС). Согласно этой технологии топочный мазут, традиционно используемый 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). ЭТХПТ заключается в нагреве аэросмеси 4 (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой от плазмотрона 2 до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Тем самым из исходного угля получают высокорекреакционное 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).

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 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 ПТС). 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 получаемого из аэросмеси в ПТС двухкомпонентного высокорекреакционного топлива (синтез-газ и коксовый остаток) рассчитывались с использованием программы Плазма-Уголь. Они являлись начальными параметрами для трехмерного расчета топки котла БКЗ-75 (Рис. 1), оснащенного ПТС,

которые выполнялись по программе Cinar ICE. Эта же программа использовалась и для расчетов традиционного режима сжигания угля в топке котла БКЗ-75.

Математическая модель процесса ЭТХПТ описывает двухфазный (угольные частицы + газ–окислитель) химически реагирующий поток, распространяющийся в камере с плазменным источником тепла. Частицы и газ поступают в камеру с одинаковыми температурами, между частицами, газом и плазменным 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.

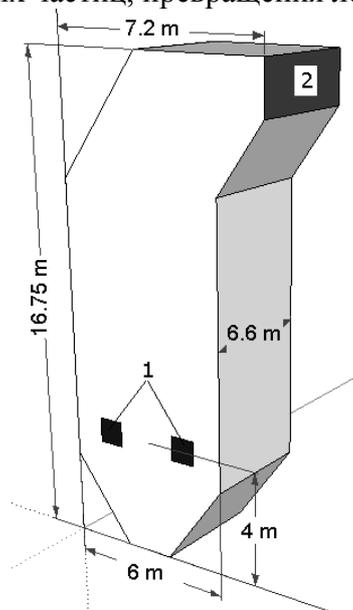


Рис. 1. Общий вид топки котла БКЗ-75: 1 – амбразуры для установки пылеугольных горелок, 2 – сечение поворотной камеры котла

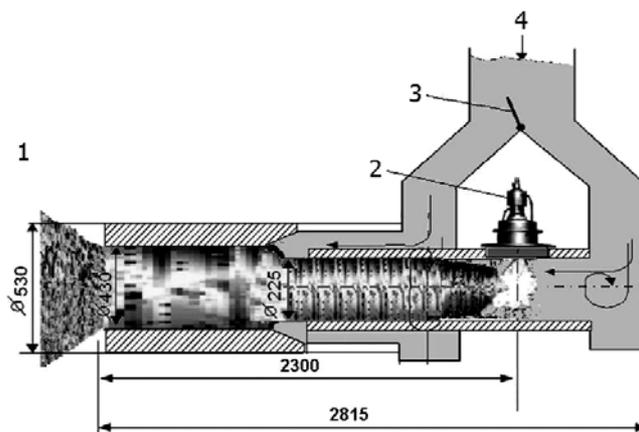


Рис.2. Общий вид ПТС: 1 – топочное пространство, 2 – плазматрон, 3 – регулирующий шибер, 4 – подача аэросмеси

Для математического описания процесса ЭТХПТ были приняты следующие основные допущения [3]. Предполагается, что процесс одномерный и квазистационарный. Процесс ЭТХПТ осуществляется при атмосферном давлении и среднемассовых температурах 1000-1500 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 ЭТХПТ аэросмесь предполагается однородной. Плазменный источник учитывался в уравнении сохранения энергии как внутренний тепловой источник с эмпирически задаваемым распределением тепловыделения по оси камеры ЭТХПТ. Сделанные допущения позволяют ограничиться системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Программа Cinar ICE (Cinar Integrated CFD Environment), разработанная в «Империал Колледж Лондон» [4, 5], 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 массы, импульса и энергии для газовой и твердой фаз. Динамика газа рассматривается в Эйлеровой системе [6], 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 [7]. Для учета радиационного теплообмена используется шестипоточная модель излучения и переизлучения частиц [8]. Дискретизация исходных уравнений осуществляется методом контрольного объема. Для расчета поля давлений используется алгоритм SIMPLE [7]. Динамика газовой фазы описывается уравнениями неразрывности, движения, энтальпии смеси для турбулентного потока и уравнением смешения для присутствующих компонентов смеси.

Котел БКЗ-75 оборудован четырьмя вихревыми пылеугольными горелками, установленными по две горелки с фронта и с тыла в один ярус (рис.1). В котле сжигается пыль Карагандинского каменного угля зольностью 35.1% с выходом летучих 22%, влажностью 10.6% и теплотой сгорания 18550 кДж/кг. Средний размер угольных частиц – 75 мкм. Исходные данные для расчета ПТС по программе Плазма-Уголь приведены в табл. 1.

На рис. 3 и 4 представлены распределения температур и концентраций компонентов газовой фазы по длине ПТС. Как видно из рис. 4, на начальном участке ПТС ($X < 0.3$ м) температура газа превышает температуру частиц за счет первоначального теплообмена плазменного источника с газовой фазой. В дальнейшем из нагретых угольных частиц выделяются летучие (рис. 4) с одновременной газификацией углерода коксового остатка. 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 ПТС 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, что 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 ее выходе. 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 ПТС увеличивается, достигая на выходе 68 %. Такой степени газификации вполне достаточно для получения высокорекреационного двухкомпонентного топлива, интенсивно воспламеняющегося при смешении с вторичным воздухом в топочном пространстве.

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

Полученные интегральные характеристики процесса ЭТХПТ на выходе ПТС (табл. 2) использовались в качестве начальных параметров при трехмерном моделировании горения прошедшего ЭТХПТ топлива в топке котла БКЗ-75. Исходный состав угля и состав коксового остатка после ПТС приведены в таблице 3. Теплота сгорания коксового остатка составила 8580 кДж/кг. Размер расчетной сетки был принят 85 X 69 X 116.

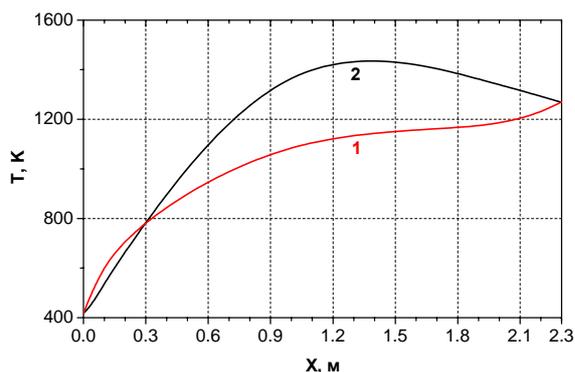


Рис. 3. Изменение температуры (Т) газа и частиц по длине ПТС (X): 1 - газ, 2 - частицы

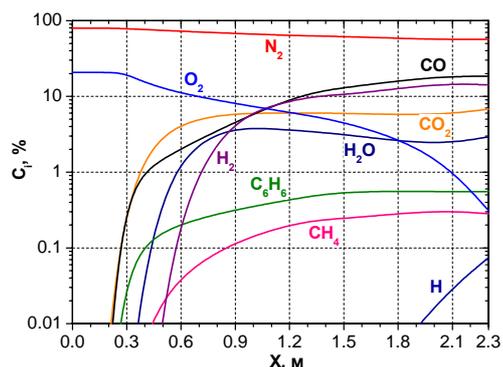


Рис. 4. Изменение концентраций компонентов газовой фазы (C_i) по длине ПТС (X)

Результаты расчета топки по программе Cinar ICE приведены на рис. 5 – 8. На рисунках позиции 1 и 2 соответственно обозначают традиционное сжигание угля и сжигание угля в топке, оснащенной двумя ПТС, расположенными с фронта котла. Как видно из рис. 5, температурные кривые имеют характерный максимум в зоне расположения горелок на высоте 4 м. При традиционном режиме горения уровень среднemasовых 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 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. 7) при плазменной активации его горения, подтверждаемым снижением концентрации кислорода в топке на этом же участке (рис. 6). 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 сжигании. ПТС также улучшает экологические характеристики процесса сжигания твердого топлива, что следует из рис. 8, демонстрирующего снижение выбросов оксидов азота более чем в 1.5 раза.

Таблица 2. Состав продуктов ЭТХПТ на выходе ПТС

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

Таблица 3. Составы угля и коксового остатка, массовые %

С _{твёрдый}	С _{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

Проведенный с использованием двух компьютерных программ комплекс исследований показал, что снижение мехнедожога (рис. 7) и концентрации оксидов азота (рис. 8) на выходе из топки котла при использовании ПТС повышает эколого-экономические показатели ТЭС.

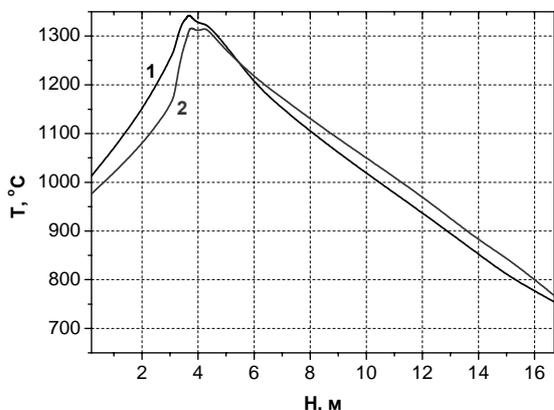


Рис. 5. Распределение среднemasовой температуры (Т) по высоте котла (Н)

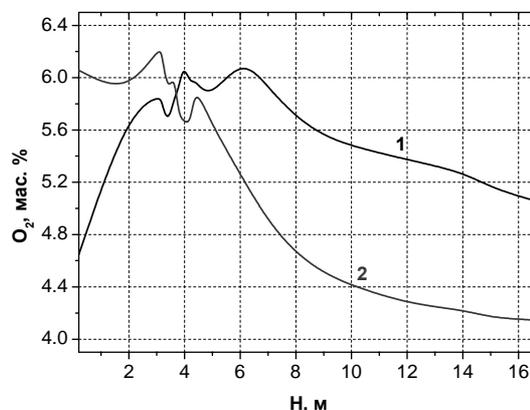


Рис. 6. Распределение среднemasовой концентрации кислорода по высоте котла (Н)

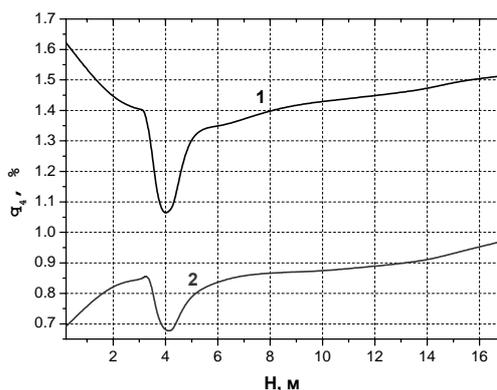


Рис. 7. Распределение средних значений мехнедожога (q_4) по высоте котла (Н)

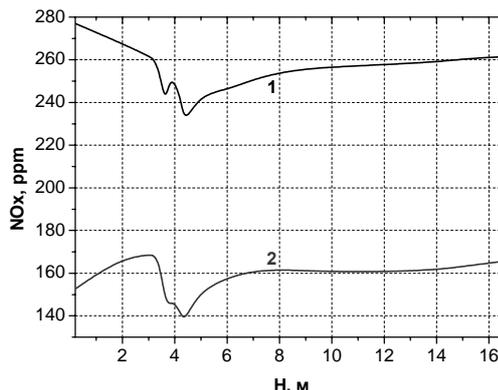


Рис. 8. Распределение среднemasовой концентрации NO_x по высоте котла (Н)

Литература

1. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии топливо-использования. – Новосибирск: Наука, 1998. - 385 с. (Концепция и расчетно-теоретические исследования плазменно-энергетических технологий. Т.1).
2. Аскарова А.С., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимическая активация горения твердых топлив. Химия высоких энергий 2006, том 40, № 2, С. 141-148
3. 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.
4. 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.
5. Lockwood F.C., Mahmud T., Yehia M.A. Simulation of pulverised coal test furnace performance. // Fuel, 77. N.12, 1998, p. 1329.

6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости, М., Атомиздат, 1984, 152 с.

7. 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.

8. 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.

ҚАЗАННЫҢ ШАҢТОЗАНДЫ ОТЫНЫНДАҒЫ ЖАНУ АЛАУЫНЫҢ ПЛАЗМОХИМИЯЛЫҚ АКТИВАЦИЯСЫ

В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, Ә.С. Асқарова, А.О. Нагибин

Көмірдің дәстүрлі жанудың және оттық кеңістігінде плазмалық активациясымен жанатын үрдістердің салыстырмалы сандық есептердің нәтижелері көрсетілген. Есептер екі компьютерлік бағдарламалармен жүргізілген: екі фазалық ағында плазмалық көзімен бірге отын термохимиялық айналуын бөлшек кинетикасын ескере алатын бір өлшемдік – «Плазма – Көмір», және оттықтың геометриясын, кеңестіктің турбуленттілігін, радиациялық жылу алмасуын және көмірдің бөлшектерінің жедел кинетика моделі бойынша жануын ескере алатын үш өлшемдік – «Cinar ICE». Көмір жануының активтенуі және жылу электрстансасының экологиялық (ЖЭС) - экономикалық көрсеткіштерін жақсарту үшін плазмалық – отындық жүйесі қолданудың болашағы көрсетілген.

PLASMA-CHEMICAL ACTIVATION OF FLAME COMBUSTION IN THE FURNACE OF A PULVERIZED COAL FIRED BOILER

V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, A.S. Askarova, A.O. Nagibin

Results of comparative numerical calculations of conventional combustion of coal and combustion of plasma-chemically 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.