

УДК 533.9.15:662.61

Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой

В.Е. Мессерле¹, А.Б. Устименко², А.С. Аскарлова³, А.О. Нагибин³

¹*Улан-Удэнский филиал Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

²*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан*

³*Физический факультет КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

E-mail: ust@physics.kz

На основе уравнений многокомпонентных турбулентных реагирующих двухфазных течений численно моделируется горение пылеугольного факела. Представлены результаты трехмерного моделирования процессов традиционного сжигания угля и сжигания с плазменной активацией горения в топочном пространстве. Проведена верификация программы Cinar ICE при сжигании угля в экспериментальной топке тепловой мощностью 3 МВт, оснащенной плазменно-топливной системой. Исследована работа топки в традиционном режиме сжигания и с плазменной активацией горения угля. Выявлено влияние плазменной активации горения на теплотехнические характеристики факела, снижение механического недожога топлива и концентрации оксидов азота на выходе топки.

Ключевые слова: горение, пылеугольное топливо, плазма, топка котла, трехмерное моделирование, верификация модели.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время переориентация топливного баланса тепловых электростанций (ТЭС) с газообразных и жидких топлив на твердые является мировой тенденцией. Доля пылеугольных ТЭС в выработке электроэнергии в развитых странах постоянно увеличивается, составляя около 60 % в США, 80 % в Казахстане и 87 % в Китае [1]. В этой связи повышение эффективности использования твердых топлив, недостижимое без всестороннего исследования процессов горения пылеугольного факела в топках котлов ТЭС, является одной из наиболее актуальных проблем современной теплофизики [2].

Для повышения эффективности использования твердых топлив, снижения доли мазута и природного газа в топливном балансе ТЭС, а также вредных пылегазовых выбросов разработана плазменная технология воспламенения углей, основанная на их электротермохимической подготовке к сжиганию (ЭТХПТ) [3, 4]. ЭТХПТ реализуется на ТЭС с использованием плазменно-топливных систем (ПТС). По этой технологии дополнительные топлива, мазут или природный газ, традиционно используемые для растопки котлов и стабилизации горения пыле-

угольного факела, заменяют основным топливом — угольной пылью, подвергаемой ЭТХПТ в объеме пылеугольной горелки с использованием электродуговых плазмотронов, являющихся основным элементом ПТС (рис. 1). Технология ЭТХПТ заключается в нагреве электродуговой плазмой от плазмотрона 1 части аэросмеси 3 (угольная пыль + первичный воздух) до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Тем самым из исходного угля получают высокорреакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток), которое при смешении с основной аэросмесью 6 окисляется в первичном воздухе, обеспечивая термохимическую подготовку последней. При смешении с вторичным воздухом 12 в топке котла 11 полученное высокорреакционное двухкомпонентное топливо самовоспламеняется и устойчиво горит без сжигания дополнительного топлива.

Для совершенствования и распространения плазменной технологии воспламенения угля необходимо детальное математическое моделирование этого процесса на основе его адекватной физической модели. Отсутствие подробных экспериментальных данных по плазменному воспламенению углей и совместному его сжиганию с высокорреакционным двухкомпонентным топливом усложняет разработку таких математических и физических моделей. Последнее требует знания основных параметров процессов ЭТХПТ и горения: полей температур, скоростей и концентраций газообразных и конденсированных компонентов.

Для получения необходимых параметров процессов ЭТХПТ и горения в топках котлов численный эксперимент является одним из наиболее экономичных и удобных способов для детального анализа и более глубокого понимания протекающих при этом сложных физических и химических процессов, близких к натурным.

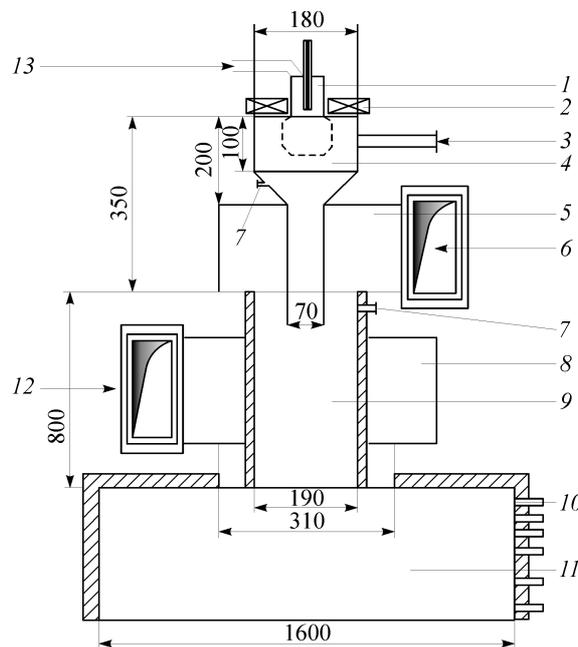


Рис. 1. Схема компоновки камеры ЭТХПТ с плазмотроном и вихревой пылеугольной горелкой.

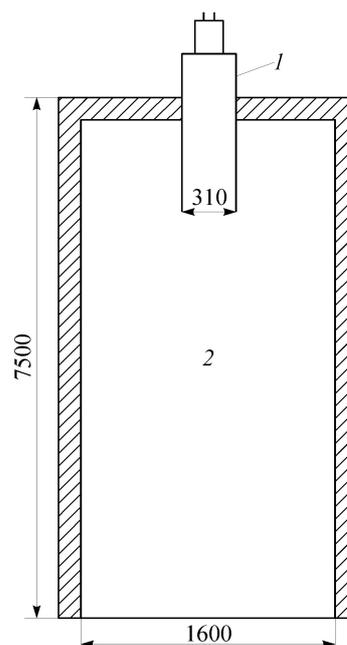
1 — плазмотрон, 2 — электромагнитная катушка, 3 — аэросмесь, 4 — камера ЭТХПТ, 5 — улитка аэросмеси, 6 — аэросмесь, 7 — лючок для измерения температуры и отбора проб газа, 8 — улитка вторичного воздуха, 9 — центральная труба горелки, 10 — лючки для измерений температуры и отбора проб газа и коксового остатка, 11 — топочная камера, 12 — вторичный воздух, 13 — плазмообразующий воздух.

Рис. 2. Общий вид экспериментальной топки.

1 — вихревая пылеугольная горелка, 2 — топка.

В этой связи, для более полного понимания физического механизма процессов ЭТХПТ и горения, а также верификации компьютерной программы *Cinag ICE* были проведены исследования сжигания угля в экспериментальной топке тепловой мощностью 3 МВт, оснащенной плазменно-топливной системой (рис. 2).

Для теоретического исследования процесса сжигания аэросмеси с предварительной плазменной подготовкой ее к сжиганию использованы две компьютерные программы: одномерная *PLASMA-COAL*, учитывающая детальный механизм кинетики термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником, и трехмерная *Cinag ICE*, учитывающая реальную геометрию топки и кинетику процесса горения угольных частиц по упрощенной кинетической схеме. С помощью первой численно исследованы процессы, протекающие в камере ЭТХПТ, а с помощью второй — выполнено моделирование рабочего процесса топки котла при совместном сжигании с углем высокорекреакционного двухкомпонентного топлива. Программа *PLASMA-COAL* верифицирована с использованием экспериментальных данных, полученных на опытных плазменных газификаторах и действующих ПТС [5–8]. Программа *Cinag ICE* также верифицирована для трехмерных расчетов традиционных топочных процессов [9–11]. Однако при использовании этой программы для расчетов топков с ПТС и получения исходных данных для их проектирования необходима верификация программы *Cinag ICE* при расчетах процессов горения угля с плазменной активацией.



МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для верификации программы *Cinag ICE* выбраны два режима работы экспериментальной топки (см. рис. 2): традиционный и с плазменной активацией горения. Плазменная активация горения обеспечивалась факелом плазмотрона, работающего на мощности 36 кВт. Параметры двухкомпонентного высокорекреакционного топлива, получаемого в плазменно-топливной системе (см. рис. 1), рассчитывались с использованием программы *PLASMA-COAL*. Они являлись начальными параметрами для трехмерного расчета экспериментальной топки (см. рис. 2), оснащенной ПТС, выполняемого с использованием трехмерной программы вычислительной гидродинамики *Cinag ICE*. Эта же программа использовалась и для расчетов режима сжигания угля в топке, оснащенной обычной вихревой пылеугольной горелкой.

Математическая модель процесса ЭТХПТ, лежащая в основе программы *PLASMA-COAL*, описывает двухфазный (угольные частицы + воздух) химически реагирующий поток, распространяющийся в камере с плазменным источником (электрическая дуга или плазменный факел). Частицы и газ поступают в камеру с одинаковыми температурами, между частицами, газом и плазменным источником имеет место тепломассообмен. Также учитываются обмен теплом и импульсом между двухфазным потоком и стенкой камеры и следующие термохимические

превращения топлива и окислителя: выделение летучих продуктов из угольных частиц, их превращения в газовой фазе и газификация коксового остатка. При расчетах концентрации оксидов азота учитывается образование топливных, термических и быстрых оксидов азота [12].

Для математического описания процесса ЭТХПТ приняты следующие основные допущения [4, 7, 12-14]. Предполагается, что процесс одномерный и стационарный. Процесс ЭТХПТ осуществляется при атмосферном давлении и средне-массовых температурах 1000–1200 °С. При этом поток газа, как правило, сильно турбулизован и распределения температур, скоростей и концентраций компонентов по радиусу камеры практически равномерны, а изменение этих параметров происходит только по оси камеры. Также в модели не учитывается взаимодействие частиц между собой, допускается их изотермичность, а на входе в камеру ЭТХПТ смесь газа и частиц предполагается однородной.

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

Электрическая дуга или плазменный факел учитываются 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.

Результаты расчетов ЭТХПТ по одномерной программе PLASMA-COAL использовались в качестве исходных данных для трехмерных расчетов топки по программе Cinar ICE.

Программа Cinar ICE (Cinar Integrated CFD Environment), разработанная в Империял Колледж Лондон [4, 9–11], предназначена для физического моделирования и расчета гидродинамики, теплообмена и горения топлив в трехмерном пространстве топочных устройств. Основу математической модели и реализующей ее программы представляет получивший наибольшее распространение метод, базирующийся на Эйлеровом подходе описания движения и теплообмена газовой фазы [14, 15] и Лагранжевом подходе описания движения и теплообмена одиночных частиц топлив вдоль их траекторий [9, 16–19]. В этом методе используются пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. 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 [17]. Радиационный теплообмен представляется шестипоточной моделью излучения и переизлучения частиц [18]. Дискретизация исходных уравнений осуществляется методом контрольного объема. Для расчета поля давлений используется алгоритм SIMPLE [14, 16, 17]. Динамика газовой фазы описывается уравнениями неразрывности, движения, энтальпии смеси для турбулентного потока и уравнением смешения для присутствующих компонентов смеси.

Для расчетов по вышеописанным программам PLASMA-COAL и Cinar ICE использовалась экспериментальная топка, оборудованная вихревой горелкой, установленной аксиально на крышке топки (см. рис. 2). В эксперименте [6] сжигалась пыль Экибастузского угля зольностью 45,2 %, выходом летучих 14,7 %, влажностью 1,3 % и теплотой сгорания 15960 кДж/кг. Тонина помола угля составляла $R_{100} = 12,5$ %, что соответствует среднему размеру частиц 60 мкм. Расчет ЭТХПТ в объеме ПТС длиной 1,15 м по программе PLASMA-COAL выполнен при следующих параметрах: мощность плазмотрона — 36 кВт, начальная температура аэросмеси — 300 °С, расход угля и воздуха через ПТС — 410 и 600 кг/час

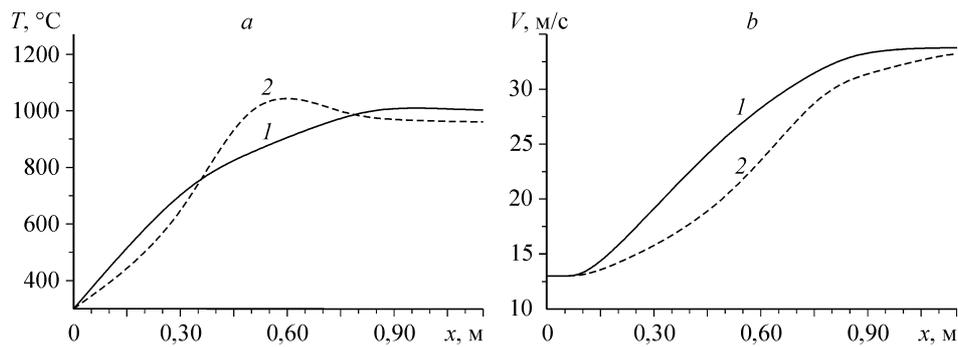


Рис. 3. Изменения по длине ПТС: a — температуры газа (1), частиц (2), b — скорости газа (1) и частиц (2).

соответственно. В расчетах пренебрегалось содержанием в воздухе диоксида углерода и благородных газов и принималось, что воздух состоит из азота (79 об. %) и кислорода (21 об. %).

В результате расчета получены следующие характеристики процесса ЭТХПТ: распределения температур (рис. 3, a), скоростей (рис. 3, b) газа и частиц, концентраций компонентов газовой фазы (рис. 4, a), степени газификации и концентрации углерода в коксовом остатке (рис. 4, b).

На рис. 3, a видно, что температуры газа и угольных частиц увеличиваются по длине ПТС. На начальном участке ($0 < X < 0,35$ м) превалирует теплообмен плазменного источника с газовой фазой, от которой нагреваются угольные частицы. Далее на участке $0,35 \leq X < 0,8$ м за счет окисления углерода и соответствующего тепловыделения на поверхности угольных частиц их температура увеличивается до 1121 $^{\circ}\text{C}$, превышая таковую для газа на 264 град. В результате этого явления наблюдается инверсия температурных кривых на этом участке. Температура газа достигает максимума в 1015 $^{\circ}\text{C}$ ($X = 0,9$ м), незначительно снижаясь к выходу ПТС ($T = 1002$ $^{\circ}\text{C}$). При этом температура газа превышает температуру частиц на 41 град, что связано с теплоотдачей от частиц излучением на стенку ПТС.

Скорости газа и частиц (см. рис. 3, b), одинаковые на входе в ПТС, также возрастают по длине, достигая на выходе из системы максимума в 33,8 и 33,2 м/с соответственно. При этом скорость газа превышает скорость частиц по всей длине ПТС. Отметим, что скорость потока на выходе из ПТС значительно превышает

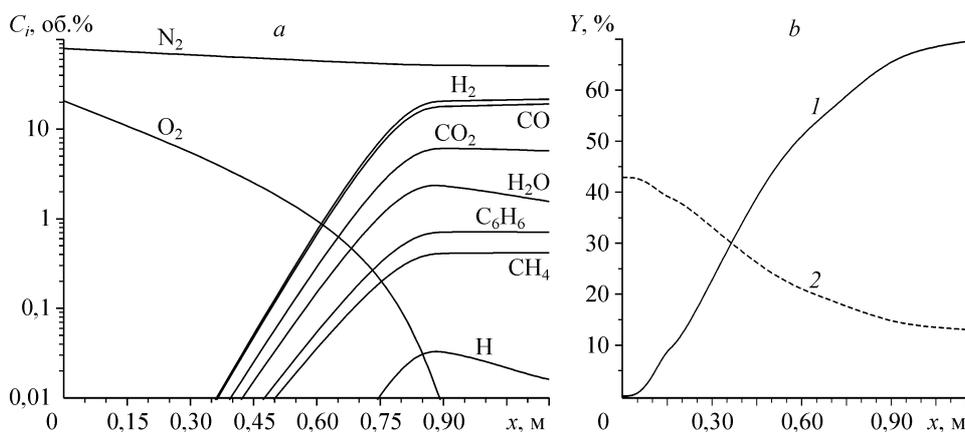


Рис. 4. Изменения по длине ПТС: a — концентраций компонентов газовой фазы, b — степени газификации (1) и концентрации углерода (2) в коксовом остатке.

Таблица 1

Характеристики продуктов ЭТХПТ на выходе ПТС

Состав газовой фазы (об. % и кг/ч)							Зола, кг/ч	С, кг/ч
H ₂	CO	CH ₄	C ₆ H ₆	CO ₂	H ₂ O	N ₂		
21,6	19,2	0,4	0,7	5,8	1,6	50,8	185,3	68,4
14,0	174,2	2,2	18,0	82,2	9,1	462,0		
Температура газа, °С			Температура частиц, °С				Скорость потока, м/с	
1002			961				33,8	

скорость аэросмеси на выходе традиционных пылеугольных горелок.

При нагреве угольных частиц наблюдается выделение летучих угля с одновременной газификацией углерода коксового остатка (рис. 4, *a, b*). Концентрации горючих компонентов (CO, H₂, H, CH₄, C₆H₆) возрастают по длине ПТС, достигая своего максимума (41,8 %) на выходе из системы. При этом концентрация окислителей (CO₂, H₂O, O₂) на выходе ПТС суммарно не превышает 7,3 %. Концентрация азота (N₂) по длине ПТС снижается от 79 до 50,8 % на выходе из нее. Концентрация углерода в коксовом остатке снижается, а степень газификации углерода (см. рис. 4, *b*) возрастает по длине ПТС, достигая на выходе 69,5 %, что вполне достаточно для получения высокорекреационного двухкомпонентного топлива, интенсивно воспламеняющегося при смешении с вторичным воздухом в топочном пространстве. Теплота сгорания коксового остатка составила 7200 кДж/кг.

Полученные интегральные характеристики процесса ЭТХПТ на выходе ПТС (табл. 1) использовались в качестве исходных данных при численном моделировании горения продуктов ЭТХПТ в экспериментальной топке с использованием программы Cinar ICE. Дополнительные исходные данные для трехмерного расчета экспериментальной топки приведены в табл. 2.

Результаты расчета топки по программе Cinar ICE приведены на рис. 5–7. Рис. 5, *a, b* наглядно демонстрируют различие полей температуры в двух режимах сжигания угля в топке, традиционном (см. рис. 5, *a*) и с предварительной плазменной активацией аэросмеси в ПТС (см. рис. 5, *b*). При традиционном сжигании угля симметричный факел с максимальной температурой 1580°С образует общее ядро факела с температурой около 1600°С. Влияние ПТС проявляется в изменении формы факела высокорекреационного двухкомпонентного топлива, уменьшении его длины и повышении максимальной температуры до 2015°С. Это объясняется более ранним воспламенением и более полным выгоранием высокотемпературных продуктов ЭТХПТ (см. табл. 1), обладающих повышенной реакционной способностью по сравнению с исходным углем.

Таблица 2

Исходные данные для трехмерных расчетов топки

Характеристика	Традиционный режим	Режим с ПТС
Расход угля, кг/ч	410	410
Расход первичного воздуха, кг/ч	600	600
Расход вторичного воздуха на котел, кг/ч	2322	2322
Температура первичного воздуха, °С	300	300
Температура вторичного воздуха, °С	300	300
Расход коксового остатка после ПТС, кг/ч	–	253,7
Расход газообразных продуктов ЭТХПТ, кг/ч	–	761,6
Плотность угля, кг/м ³	1200	1200
Размер расчетной сетки	56×56×60	56×56×60

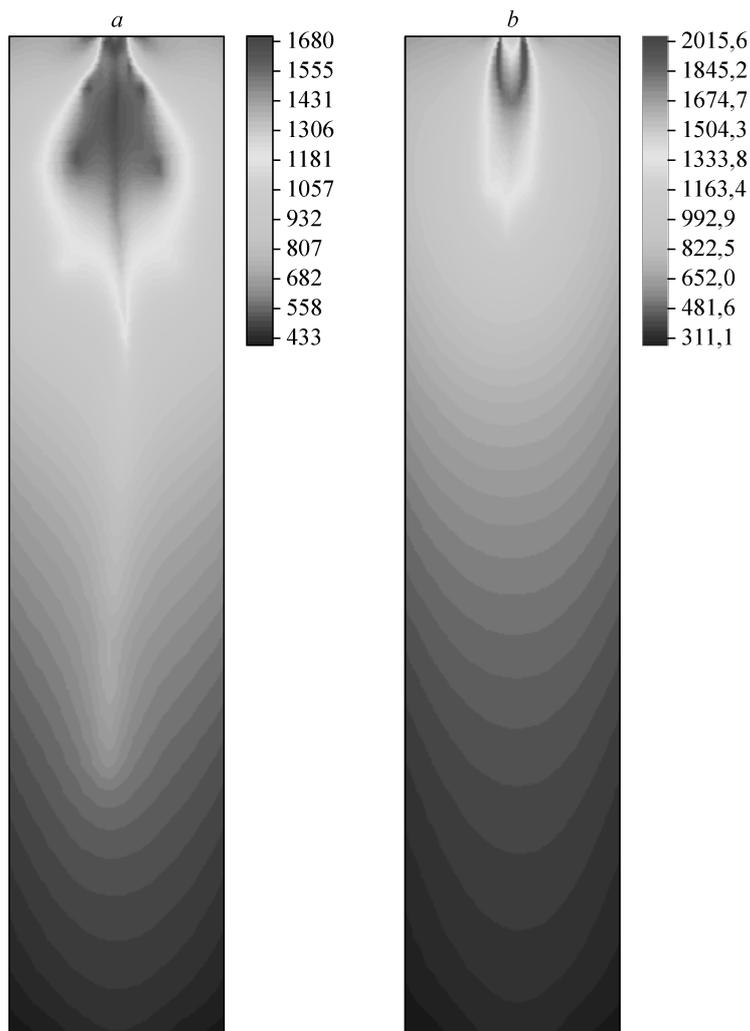


Рис. 5. Поле температур в продольном центральном сечении топки: *a* — при традиционном режиме горения угля, *b* — при сжигании угля, активированного в ПТС.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как видно из рис. 6, *a* экспериментальные и расчетные температурные зависимости качественно подобны и имеют характерный максимум в зоне расположения горелки на расстоянии $H = 0,5$ м от крышки топки. При традиционном режиме горения уровень максимальных температур в топке на расстоянии $H < 0,13$ м выше такового при горении активированного в ПТС топлива. Разница температур достигает 164 градусов ($0,025 < H < 0,13$ 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. Это приводит к трехкратному снижению суммарной поверхности излучающих частиц. На участке $0,13 \leq H < 0,6$ м температура в режиме с плазменной активацией горения топлива выше такой же при традиционном горении. Максимальная разница при $H = 0,4$ м

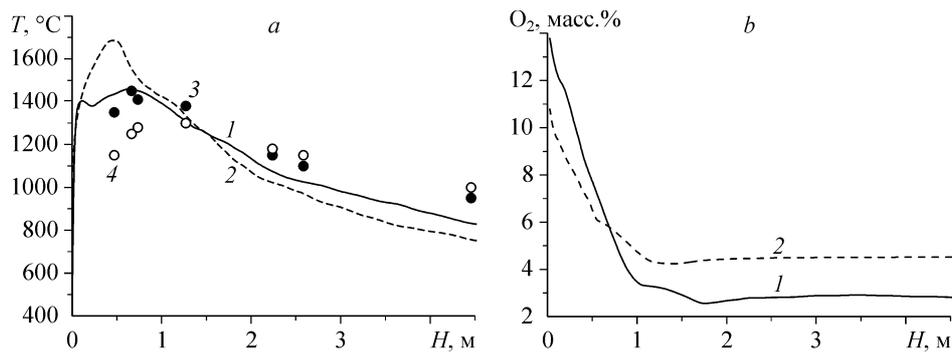


Рис. 6. Распределения максимальной температуры продуктов сгорания топлива (а) и среднemasсовой концентрации кислорода (b) по высоте топки.

1 — традиционное сжигание угля (а, b), 2 — сжигание угля в топке с ПТС (а, b), 3, 4 — экспериментальные данные по сжиганию угля в топке с ПТС и без них соответственно.

достигает 260 град. В эксперименте максимальная температура горения активированного топлива выше такой же при традиционном сжигании угля на 200 град. Однако сам максимум температур незначительно смещен вниз по течению и наблюдается на высоте топки $H = 0,67$ м.

Более высокая температура факела при плазменной активации топлива объясняется более полным его выгоранием, подтверждаемым более резким снижением концентрации кислорода в топке на участке $H < 0,67$ м (см. рис. 6, b). Отметим, что концентрация несгоревшего углерода, характеризующая механический недожог топлива и, соответственно, полноту выгорания угля, на выходе из топки ($H = 7,5$ м) при использовании ПТС примерно в 4 раза ниже, чем при традиционном сжигании (см. рис. 7). Плазменно-топливная система также улучшает экологические характеристики процесса сжигания твердого топлива, что следует из рис. 7, демонстрирующего двукратное снижение выбросов оксидов азота.

Таким образом, для верификации программы трехмерных расчетов Cinar ICE были использованы данные натурных исследований экспериментальной топки [6]. Рис. 6, a подтверждает качественное соответствие расчетных и опытных данных, проявляющееся в наличии инверсии температурных кривых на начальном участке топки и характерных температурных максимумов. Температура продуктов сгорания на выходе экспериментальной топки в традиционном режиме сгорания выше

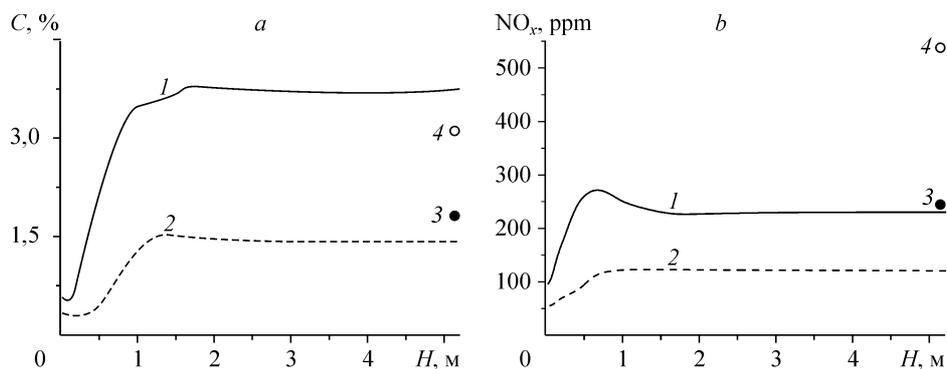


Рис. 7. Распределения средних значений концентрации углерода в продуктах сгорания топлива (а) и среднemasсовой концентрации NO_x (b) по высоте топки.

1 — традиционное сжигание угля, 2 — сжигание угля в топке с ПТС, 3, 4 — экспериментальные данные по сжиганию угля в топке с ПТС и без них соответственно.

таковой при использовании ПТС как в опыте, так и в расчетах. Расхождение опытных и расчетных значений температуры продуктов сгорания не превышает 20 % по всей высоте топки. Такое расхождение объясняется использованием в программе Cinar ICE упрощенной кинетической схемы (fast chemistry) горения топлива.

Концентрация несгоревшего углерода в коксовом остатке измерялась на выходе экспериментальной топки (см. рис. 7, а). Расхождение опытных и расчетных значений также не превышает 20 %. Что касается оксидов азота, то их концентрация на выходе экспериментальной топки при плазменной активации значительно ниже, чем при традиционном сжигании угля, как в опыте, так и в расчетах. Однако существенное количественное расхождение опытных и расчетных значений концентраций оксидов азота (52–54 %) показывает, что кинетическая схема их образования, заложенная в программе Cinar ICE, нуждается в уточнении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована работа котла в традиционном режиме сжигания и с плазменной активацией горения угля. Выявлено влияние плазменной активации горения на теплотехнические характеристики факела, снижение механического недожога топлива и концентрации оксидов азота на выходе топки. Проведенные сравнительные численные исследования процессов традиционного сжигания угля с плазменной активацией его горения в топочном пространстве показали удовлетворительное качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных по основным параметрам процесса горения угля (температуры, концентрации несгоревшего углерода, кислорода и оксидов азота в продуктах сгорания). Верификация программы Cinar ICE при сжигании угля в экспериментальной топке тепловой мощностью 3 МВт, в режимах ее работы с ПТС и без ПТС, подтверждает правомерность использования данного программного комплекса (PLASMA-COAL и Cinar ICE) для расчетов топок промышленных котлов с ПТС, разработок схем компоновок ПТС с топкой и получения надежных исходных данных для их проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Е.И., Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных ТЭС Евразии. // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 10–14.
2. Макаров А.А. Проблемы и перспективы развития топливно-энергетического комплекса России // Энергоэффективность: Тезисы докладов Международной научно-техн. конф. (6-8 октября 2008 г., Киев, Украина). Киев: Институт газа НАНУ, 2008. С. 7–10.
3. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии топливо-использования. Новосибирск: Наука, 1998. Т. 1. 384 с.
4. Gorokhovski M.A., Jankoski Z., Lockwood F.C., Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Enhancement of pulverized coal combustion by plasma technology // Combustion Science and Technology. 2007. Vol. 179, No. 10. P. 2065–2090.
5. 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, No. 1. P. 141–167.
6. Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. Алматы: Наука, 1993. 259 с.
7. Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma technologies for solid fuels: experiment and theory // J. of the Energy Institute, 2005. Vol. 78. No. 4. P. 157–171.
8. Янкоски З., Локвуд Ф.К., Мессерле В.Е., Карпенко Е.И., Устименко А.Б. Моделирование плазменной подготовки угольной пыли к сжиганию // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Том 11, № 3. С. 473–486.
9. Lockwood F.C., Salooja A.P., Syed A.A. A prediction method for coal-fired furnaces // Combustion and Flame. 1980. Vol. 38, No. 1. P. 1–15.

10. **Lockwood F.C., Mahmud T., Yehia M.A.** Simulation of pulverised coal test furnace performance // Fuel 1998. Vol. 77, No. 12. P. 1329.
11. **Lockwood F.C., Mahmud T.** The prediction of swirl burner pulverised coal flames // Twenty-Second Symp. (Inter.) on Combustion, Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1988. P. 165.
12. **Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б.** Математическая модель процессов воспламенения, горения и газификации пылеугольного топлива в устройствах с электрической дугой // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 2. С. 173–187.
13. **Goal A., Gidaspow D.** Modelling of entrained flow in coal hydrolysis reactors. 1. Mathematical formulation and experimental verification. 2. reactor design. // Ind. and Engng. Chem. Process Des. and Develop. 1982. Vol. 21. P. 611–632.
14. **Старченко А.В.** Математическое моделирование образования оксидов азота при горении пылеугольного топлива // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 3–13.
15. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости, М.: Атомиздат, 1984. 152 с.
16. **Spalding D.B.** Computer simulation of flow, heat transfer and combustion of solid fuel in furnaces. // Сб. докл. VII Межд. конф. “Горение твердого топлива”, Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2009. Ч. 1. С. 3.1–3.8.
17. **Lauder B.E., Spalding D.B.** The numerical computation of turbulent flows // Comput. Meth in Appl. Mech. and Engng. 1974. Vol. 3, No. 2. P. 269–289.
18. **Lockwood F.C., Shan N.G.** Evaluation of an efficient radiation flux model for furnace prediction procedures // Proc. Sixth Inter. Heat Transfer Conf. 1978. P. 1405–1413.
19. **Lockwood F.C., Shan N.G.** A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures // Proc. 18th Inter. Symp. On Combustion. Pittsburg. The Combustion Inst., 1981. P. 1405–1413.

Статья поступила в редакцию 11 января 2010 г.