

УДК 621.039.6; 536.46; 533.6; 532.517.4

Численное моделирование процесса горения угля, инициируемого плазменным источником*

А.С. Аскарлова¹, В.Е. Мессерле², А.Б. Устименко³, С.А. Болегенова¹, В.Ю. Максимов¹

¹*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

³*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан*

E-mail: ust@physics.kz

С использованием метода трехмерного моделирования выполнены численные эксперименты по факельному сжиганию угольной пыли, прошедшей плазменную термохимическую подготовку к сжиганию. Показано, что плазменная подготовка угля к сжиганию позволяет оптимизировать процесс, улучшить условия воспламенения и горения и минимизировать выбросы вредных веществ.

Ключевые слова: уголь, воспламенение, горение, плазма, численное моделирование.

В настоящее время в Казахстане около 85 % электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), основным топливом которых является уголь. Более 80 % угля, сжигаемого на ТЭС, является низкосортным, таким, например, как экибастузский уголь, зольность которого составляет 40–50 %. Сжигание низкосортных углей сопряжено со сложностями их воспламенения и выгорания, увеличением вредных пылегазовых выбросов (зола, оксидов азота и серы). При использовании низкосортных углей увеличивается расход мазута или природного газа, используемых для растопки котла, подхвата и стабилизации горения пылеугольного факела, и ухудшается экологическая обстановка.

В мировой практике принято обогащать угли перед их сжиганием. Однако нельзя ожидать обогащения углей в объемах, необходимых для ТЭС Казахстана и России, из-за большой стоимости обогащения, которая в России составляет около 10 долларов США за тонну угля. При этом в результате обогащения можно снизить зольность и влажность углей, тогда как увеличить выход летучих продуктов (тощие угли и антрацит имеют выход летучих 4–12 %) путем обогащения невозможно.

Для улучшения воспламенения и стабилизации горения низкосортных углей с низким выходом летучих веществ и высокой зольностью существуют дополнительные мероприятия, которые в основном сводятся к утончению помола (до $R_{90} = 6-8\%$, где R_{90} — это остаток угольной пыли при рассевке на сите с ячейкой размером 90 мкм), подогреву

* Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

аэросмеси (до 350 °С) и вторичного воздуха (до 400 °С), подаче угольной пыли высокой концентрации (до 50 кг/кг) с последующим ее разбавлением и совместному сжиганию угля с мазутом или природным газом. Все перечисленные мероприятия обладают существенными недостатками, снижающими эффективность использования топлива и надежность работы котлоагрегатов ТЭС с одновременным снижением их экологических показателей.

Для повышения эффективности использования топлива разрабатываются различные методы. Широкое развитие получили работы, связанные с воспламенением топлив с помощью низкотемпературной плазмы [1–14]. Для снижения доли мазута и природного газа в топливном балансе тепловых электростанций и для снижения вредных пылегазовых выбросов была разработана плазменная технология воспламенения, термохимической подготовки и сжигания углей и реализующие ее плазменно-топливные системы (ПТС) [15–21]. Как следует из самого определения системы, в общем случае ПТС представляет собой горелочное устройство с плазмотроном. В ПТС осуществляются процессы плазменной термохимической подготовки твердых топлив к сжиганию.

С применением плазменной активации пылеугольного потока входные параметры, используемые при расчетах, отличаются от существующих на практике при традиционной организации горения пылеугольного факела. В камеру сгорания поступает факел реагирующей топливной смеси, что вызывает изменение основных параметров процесса горения. В этой связи особую актуальность приобретает комплексное исследование рабочего процесса топочной камеры с учетом влияния термохимической подготовки топлива, в том числе численное моделирование процессов, протекающих в объеме камеры сгорания.

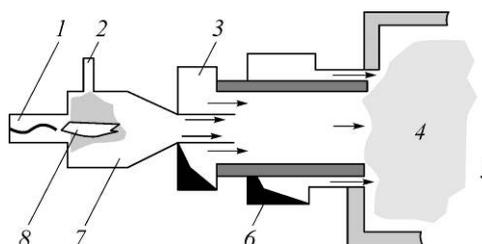
Плазменная термохимическая подготовка угля к сжиганию заключается в нагреве плазменным факелом при дефиците кислорода потока пылеугольной смеси в специальной камере до температуры, превышающей температуру самовоспламенения данного угля. При этом происходит практически полный выход летучих веществ и частичное сгорание и/или газификация углерода угля. В результате полученная топливная смесь или высокорекреакционное двухкомпонентное топливо, состоящее из горючего газа и коксового остатка, воспламеняется при смешении со вторичным воздухом и устойчиво горит без использования для стабилизации пылеугольного факела даже в холодной топке резервного высокорекреакционного топлива (мазута или природного газа). Использование различных типов горелок не вызывает отличий в механизме процесса плазменной термохимической подготовки угля к сжиганию. Применение ПТС позволяет исключить из топливного баланса ТЭС мазут, традиционно используемый для растопки котлов.

Метод термохимической плазменной подготовки угля к сжиганию успешно апробирован на ряде тепловых электростанций, что подтверждает его эффективность. Однако для широкого внедрения плазменной технологии безмазутного воспламенения углей необходима разработка специальных методов расчета горелочных устройств, что позволит до опыта оценить основные параметры протекающих процессов в объеме горелки, оснащенной плазмотроном, получить состав топливной смеси на входе в топку и рассчитать характеристики процессов тепломассопереноса в объеме камеры сгорания котла ТЭС. Использование новых компьютерных технологий моделирования позволило провести расчеты этих процессов [22–28].

Настоящая статья посвящена численному исследованию влияния плазменного источника на термохимические превращения аэросмеси и ее горение на примере сжигания экибастузского высокозольного угля в топке котла ПК-39 Аксусской ГРЭС. Таким образом, в задачу исследований входил расчет процессов горения в топке котла, оснащенного традиционными пылеугольными горелками с мазутной форсункой и ПТС (рис. 1). Для численных исследований были выбраны два режима работы котла: традиционный (с использованием двенадцати пылеугольных горелок) и с плазменной

Рис. 1. Схема вихревой ПТС.

1 — плазмотрон, 2 — меньшая часть аэросмеси, 3 — основная часть аэросмеси, 4 — факел продуктов плазменной термохимической подготовки аэросмеси, 5 — топочное пространство, 6 — вторичный воздух, 7 — камера электротермохимической подготовки топлива к сжиганию, 8 — плазменный факел.



активацией горения (с заменой шести пылеугольных горелок нижнего яруса на ПТС). Для расчетов использовались две компьютерные программы: одномерная — «Plasma-Coal», учитывающая детальный механизм кинетики термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником, и трехмерная — «FLOREAN» [23], учитывающая реальную конфигурацию топки и кинетику процесса горения угольных частиц по упрощенной кинетической схеме. Параметры получаемого из аэросмеси в ПТС высокорекреационного двухкомпонентного топлива (синтез-газ и коксовый остаток) рассчитывались с использованием программы «Plasma-Coal» [22]. Они являлись начальными параметрами для трехмерного расчета топки котла ПК-39, оснащенного ПТС, которые выполнялись по программе «FLOREAN». Эта же программа использовалась и для расчетов традиционного режима сжигания угля в топке котла ПК-39.

Топка котла ПК-39 энергоблока мощностью 300 МВт, паропроизводительностью 475 т/ч оборудована двенадцатью вихревыми трехканальными пылеугольными горелками. Горелки расположены встречно в два яруса по шесть горелок в каждом. Для интенсификации воспламенения и создания благоприятных условий устойчивого горения аэросмеси горелки имеют два типоразмера, что позволяет обеспечить разные коэффициенты избытка воздуха в них: нижний ярус $\alpha_T = 1,4$, верхний ярус $\alpha_T = 0,9$. Топливо по ярусам распределено поровну. Расход топлива на горелку составляет 7291,1 кг/ч. В качестве основного топлива используется экибастузский уголь, влажностью $W^P = 7\%$, зольностью $A^P = 40,9\%$ и составом органической массы, масс. %: $S^P = 0,8$, $C^P = 41,1$, $H^P = 2,8$, $O^P = 6,6$, $N^P = 0,8$. Теплота сгорания топлива составляет 15,87 МДж/кг, выход летучих — 30%. Тонина помола угольной пыли R_{90} составляет 14,3%. Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки составляет 1,25, в горелках — 1,15, присосы воздуха в топку составляют 0,1.

При замене проектных горелок на вихревые ПТС (рис. 1) с камерой электротермохимической подготовки топлива диаметром 0,73 м используется плазмотрон мощностью 100 кВт. Температура стенки камеры принималась равной 700 К. Среднемассовый диаметр угольных частиц составлял 60 мкм ($R_{90} = 14,3\%$), температура исходной аэросмеси на входе в ПТС оставалась такой же, как и на входе в основные горелки, и была равна 423 К, расход угля через ПТС — 7,3 т/ч. Тепловой КПД ПТС на основе опытных данных принят равным 90%. Результаты численного моделирования ПТС сведены в табл. 1. Эти данные, взятые для выходного сечения ПТС, использованы в качестве исходных для трехмерного моделирования топки энергетического котла ПК-39 Аксусской ГРЭС, шесть горелок которого виртуально переоборудованы в ПТС [26–27].

Таблица 1

Основные характеристики ВДТ на выходе ПТС

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	NO, мг/нм ³	X _C , %	V _g , м/с	T _g , К	t _g [*] , с
Объемные %											
11,04	2,17	0,22	13,53	1,93	70,55	0,13	7,5	67,6	42,1	1076	0,016

* X_C — степень газификации угля, V_g — скорость потока, T_g — температура потока ВДТ, t_g — время пребывания топлива в ПТС.

На рис. 2а и 3а представлены векторы полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания ($H = 7,32$ м) для традиционного сжигания угля в плоскости расположения горелок (рис. 2) и на выходе из нее (рис. 3). На рис. 2б и 3б — для камеры сгорания с тем же сечением, нижний ярус которой оборудован шестью ПТС, на рис. 3с — для топочной камеры, оборудованной двенадцатью ПТС.

Анализ полученных полей скорости показал, что активация пылеугольного потока оказывает значительное влияние на поле течения, а именно: на распространение реагирующей струи в объеме топки, на процессы подмешивания в струе, на размеры и форму факелов. Наблюдается существенное различие в распределении пылеугольных потоков, поступающих в топку через обычные горелки и через ПТС. Основной причиной изменения в распределении скоростей в топочном пространстве является увеличение скорости поступающей в камеру сжигания топливной смеси (двухкомпонентное высокорекреакционное топливо). С увеличением числа ПТС, т.е. термохимически активированных топливных потоков, ядро факела смещается к центру симметрии топочной камеры и наблюдаются более четкая картина движения вихревых потоков от ПТС. В месте соударения встречных потоков в результате торможения динамический напор трансформируется в статическое давление. Под действием образовавшегося перепада давления общий поток растекается вверх и вниз по топочной камере с повышенными скоростями. При соударении встречных факелов и турбулизации потоков интенсифицируется массо- и теплообмен, а усиливающееся при этом смесеобразование и нагрев ускоряют процесс горения.

Увеличение скорости вдоль оси факела повышает интенсивность подмешивания высокотемпературных топочных газов, что в свою очередь ведет к ускорению роста температуры частиц, и, следовательно, к улучшению воспламенения пылеугольного факела из горелок, не оснащенных плазматронами. Вследствие аэродинамических особенностей термохимически активированных потоков благодаря внешней и внутренней рециркуляции (рис. 2) обеспечивается интенсивный подвод горячих топочных газов к корню факела.

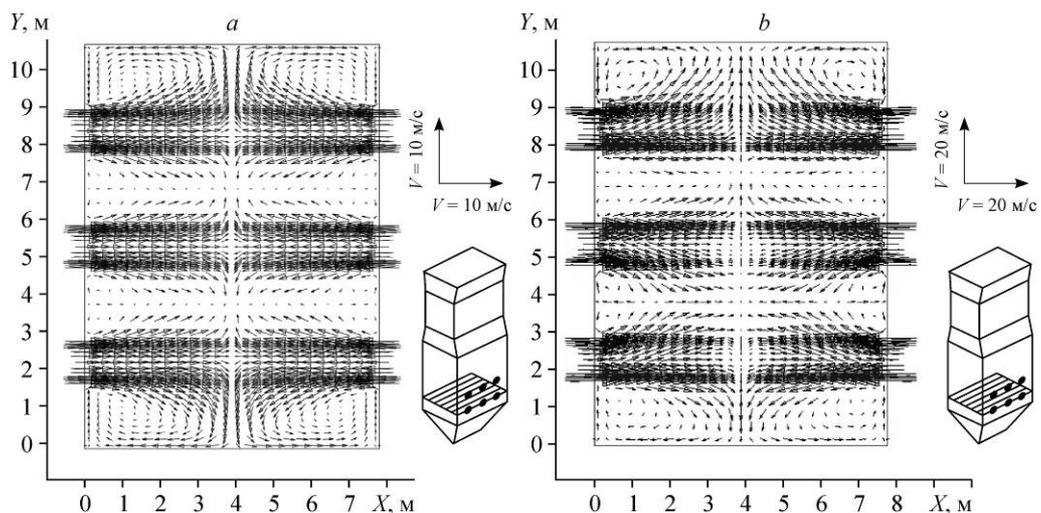


Рис. 2. Поля вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания ($H = 7,32$ м) при традиционном сжигании угля (а) и сжигании угля, активированного в шести ПТС (б).

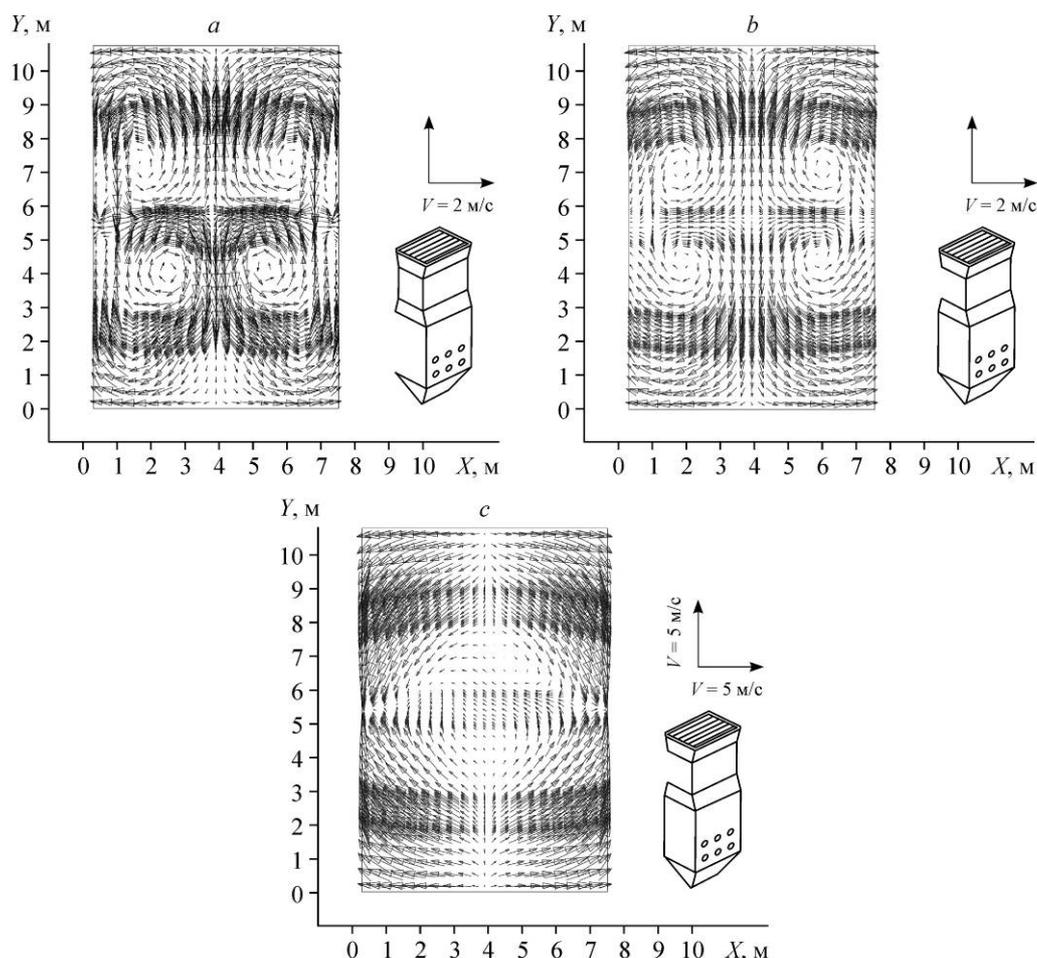


Рис. 3. Поля вектора полной скорости на выходе из камеры сгорания при традиционном сжигании угля (а), при сжигании угля, активированного в шести ПТС (b) и в двенадцати ПТС (с).

Рециркуляционная зона играет важную роль в стабилизации пылеугольного факела, поскольку обеспечивает движение горячих продуктов сгорания и сокращает размер области, в которой скорость потока сопоставима со скоростью распространения фронта пламени. Форма и размер рециркуляционной зоны и соответствующей области с повышенным уровнем турбулентности оказывают решающее влияние на устойчивость факела, интенсивность процесса горения и другие характеристики факела. Ускорение нагрева и воспламенения топлива с увеличением количества термохимически активированных потоков ведет к более быстрой стабилизации высокоинтенсивных процессов горения. Основной вихрь, поднимаясь вверх, раскручивается и на выходе из топочной камеры с увеличением числа ПТС поле скоростей выравнивается (рис. 3), области с интенсивными завихрениями сглаживаются.

На рис. 4 и 5 показаны изменения по высоте камеры сгорания значений температур и концентраций NO, рассчитанных для двух вариантов: сжигания угля с его предварительной плазменной активацией в ПТС и традиционного. Видно, что в основном температуры по высоте камеры сгорания, рассчитанные для активированного плазмой горения угля (рис. 4, кривые 2, 4, 6) ниже температур, рассчитанных для традиционного режима сжигания угля (рис. 4, кривые 1, 3, 5). Однако есть зона (нижняя часть камеры сгорания до уровня верхнего яруса горелок), в которой температура горения угля

с плазменной активацией выше температуры горения угля в традиционном режиме. Это явление может быть объяснено влиянием ПТС, которые вызывают более раннее воспламенение аэросмеси и соответствующее смещение фронта пламени к устью ПТС.

Наблюдается также влияние ПТС на образование NO (рис. 5) по высоте камеры сгорания. Как средние (кривая 4), так и максимальные (кривая 2) значения концентрации NO по высоте камеры сгорания заметно ниже в случае сжигания угля с его плазменной активацией. Отметим, что использование ПТС снижает концентрацию NO (рис. 5, кривые 2, 4, 6) даже в нижней части камеры сгорания (ниже уровня расположения ПТС). Это явление объясняется подавлением образования топливных оксидов азота внутри ПТС. Топливный азот выделяется в газовую фазу при нагреве угля вместе с летучими веществами внутри ПТС. Из-за дефицита кислорода в аэросмеси из него образуется молекулярный азот, что также подтверждается низким уровнем концентрации NO ($7,5 \text{ мг/м}^3$) на выходе ПТС, а, как известно, топливный азот является основным источником оксидов азота, образующихся при горении угля в процессе его факельного сжигания.

Рисунки 6 и 7 иллюстрируют распределение концентраций кислорода и диоксида углерода по высоте камеры сгорания. Средние значения концентраций кислорода (рис. 6, кривые 3 и 4) по всей высоте камеры сгорания ниже в случае горения угля, прошедшего предварительную термохимическую подготовку в ПТС, а средние значения концентраций диоксида углерода (рис. 7, кривые 3, 4) выше. Эти данные подтверждают тот факт, что при использовании ПТС для стабилизации горения угля, наблюдается более полное его выгорание и снижение механического недожога топлива.

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования двух вариантов: традиционного горения угля и горения угля, стабилизируемого плазмой. Сравнение расчетных данных с экспериментальными данными для традиционного сжигания угля (в табл. 2 взяты в круглые скобки) [30] показывает удовлетворительное согласие. Разница между экспериментальными и расчетными значениями искомых величин не превышает 17%. Данные, приведенные в табл. 2, демонстрируют влияние ПТС на горение угля: уровень температур на выходе камеры сгорания снижается на 9%, концентрации оксидов азота снижаются на 11,5%, кислорода — на 14%, а диоксида углерода увеличивается на 1,5%. Эти цифры подтверждают, что при стабилизации плазмой пылеугольных факелов все основные характеристики процесса значительно улучшаются.

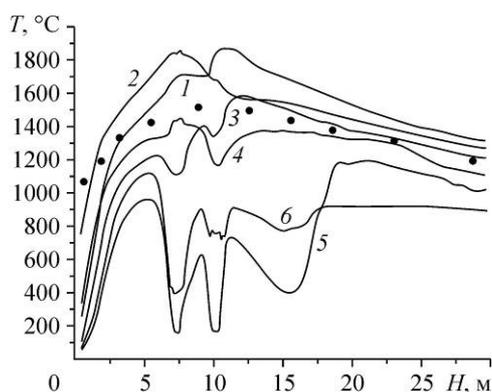


Рис. 4. Изменение температур по высоте камеры сгорания.

1, 3, 5 — традиционный режим сжигания угля;
2, 4, 6 — режим сжигания угля с плазменной активацией его в шести ПТС — максимальные, средние и минимальные значения соответственно, символы — изменения на действующем котле, традиционный режим сжигания угля [29, 30].

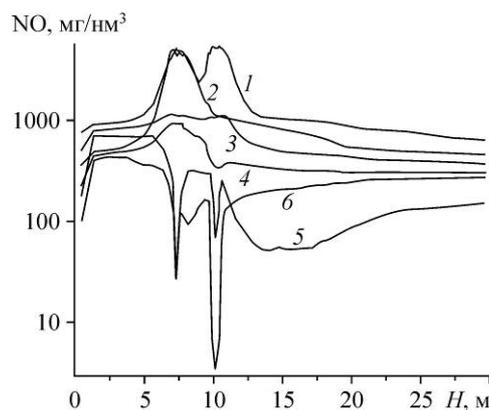


Рис. 5. Изменение концентраций NO по высоте камеры сгорания.

1, 3, 5 — традиционный режим сжигания угля;
2, 4, 6 — режим сжигания угля с плазменной активацией его в шести ПТС — максимальные, средние и минимальные значения соответственно.

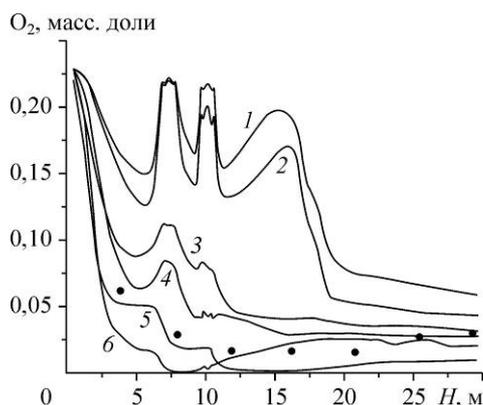


Рис. 6. Изменение концентраций кислорода по высоте камеры сгорания.

1, 3, 5 — традиционный режим сжигания угля;
2, 4, 6 — режим сжигания угля с плазменной активацией его в шести ПТС — максимальные, средние и минимальные значения соответственно, символы — измерения на действующем котле, традиционный режим сжигания угля [29, 30].

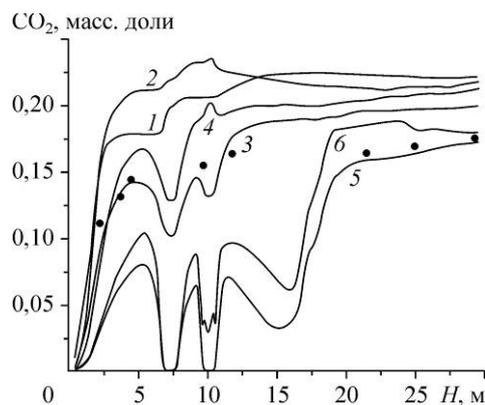


Рис. 7. Изменение концентраций диоксида углерода по высоте камеры сгорания.

1, 3, 5 — традиционный режим сжигания угля,
2, 4, 6 — режим сжигания угля с плазменной активацией его в шести ПТС — максимальные, средние и минимальные значения соответственно, символы — измерения на действующем котле, традиционный режим сжигания угля [29, 30].

Таблица 2

Сравнение характеристик отходящего газа на выходе камеры сгорания

Основные параметры	Традиционное сжигание угля	Сжигание угля, поддерживаемое плазмой
$T, ^\circ\text{C}$	1220 (1180)	1110
$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	368	280
$\text{CO}_2, \text{кг/кг}$	0,185 (0,17)	0,188
$\text{O}_2, \text{кг/кг}$	$3,18 \cdot 10^{-2}$ ($3,5 \cdot 10^{-2}$)	$1,74 \cdot 10^{-2}$

Проведенное в работе сравнительное численное исследование традиционного сжигания угля и сжигания его в топке, оборудованной ПТС, показывает, что плазменная термохимическая подготовка угля к сжиганию позволяет оптимизировать процесс, улучшить условия воспламенения и горения, минимизировать выбросы вредных веществ в атмосферу. Применение технологии ПТС позволит снизить расход условного топлива на 1 кВтч вырабатываемой энергии на 10–15 грамм условного топлива, что эквивалентно экономии 1,5–3 % топлива или повышению КПД выработки электроэнергии на 0,5–1 %. Широкое применение технологии ПТС несет в себе важный социально-экономический эффект и позволит не только улучшить экологическую обстановку в регионах около ТЭС, оптимизировать процесс сжигания энергетических углей, но и повысить уровень культуры труда работников ТЭС за счет применения более прогрессивной и экологически чистой технологии воспламенения и сжигания твердых топлив.

Список литературы

1. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 200 с.
2. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Чурашев В.Н., Карпенко Ю.Е., Зубарев Н.М., Никитин Ю.В., Конечных В.В., Журавель Н.М., Чернова Г.В. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив. Новосибирск: Наука, 2000. 159 с.
3. Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., Перегудов В.С., Буянтуев С.Л., Мессерле В.Е., Полячек М.М. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела (Низкотемпературная плазма. Т. 16). Новосибирск: Наука, 1995. 304 с.
4. Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. Алматы: Гылым, 1993. 259 с.

5. **Чмель В.Н., Дунаевская Н.И., Огий В.Н., Барбышев Б.Н.** Повышение эффективности сжигания низко-сортных топлив методом термохимической обработки // Изв. ВУЗов. Энергетика. 1985. № 3. С. 96–100.
6. **Корчевой Ю.П., Дедов В.Г., Кукота Ю.П., Нехамин М.М., Расюк Н.И., Дунаевская Н.И., Бондзик Д.Л.** Запальник для угля // Патент Украины № 51237, Бюл. № 13 от 12.07.2010.
7. **Кружилин Г.Н.** Плазменная газификация углей // Вестник АН СССР. 1980. № 12. С. 69–79.
8. **Ольховский Г.Г., Сучков С.И., Березинец П.А., Епихин А.Н., Крылов И.О., Луговская И.Г., Сомов А.А., Гудков В.Н., Заикин А.А.** Разработка отечественной ПГУ с внутрицикловой газификацией топлива // Теплоэнергетика. 2010. № 2. С. 19–26.
9. **Жуков М.Ф., Урюков Б.А., Энгельшт В.С., Лелевкин В.М.** Теория термической электродуговой плазмы Ч. 1. Методы математического исследования плазмы. Новосибирск: Наука, 1987. 287 с.
10. **Локвуд Ф.Ч., Мессерле В.Е., Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б.** Трехмерный расчет горения частично газифицированного твердого топлива в топке котла ПК-39-II Рефтинской ГРЭС // Горение и плазмохимия. 2008. Т. 6, № 2. С. 122–130.
11. **Мессерле В.Е., Устименко А.Б.** «НТО Плазмотехника» ТОО: Плазменно-топливные системы для безмазутной растопки котлов и стабилизации пылеугольного факела на ТЭС // Каталог Межгосударственной выставки «20 лет СНГ: К новым горизонтам партнерства», 28 июня–3 июля 2011 г. Москва: ВВЦ, 2011. С. 66.
12. **Вербовецкий Э.Х., Котлер В.Р.** Замена мазута углем при растопке и подсветке факела в пылеугольных котлах // Энергохозяйство за рубежом. 1984. № 4. С. 1–8.
13. **Drouet M.G.** La technologie des plasmas. Potentiel d'application au Canada // Revue générale d'électricité, 1986. No. 1. P. 51–56.
14. **Карпенко Е.М., Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Устименко А.Б.** Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных ТЭС Евразии // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 10–14.
15. **Карпенко Е.И., Жуков М.Ф., Мессерле В.Е., Буянтуев С.Л., Дьяков А.Ф., Перегудов В.С.** Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС: безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела. Новосибирск: Наука, 1998. 137 с.
16. **Карпенко Е.И., Мессерле В.Е.** Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1997. 119 с.
17. **Карпенко Е.И., Мессерле В.Е.** Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования. Т. 1. Концепция и расчетно-теоретические исследования плазменно-энергетических технологий. Новосибирск: Наука, 1998. 385 с.
18. **Даугов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Урюков Б.А., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Перегудов В.С., Устименко А.Б.** Плазменно-энергетические технологии для улучшения экологических и экономических показателей сжигания и газификации пылевидного угля // Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: проблемы и перспективы (Низкотемпературная плазма. Т. 20). Новосибирск: Наука, 2004. С. 341–366.
19. **Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov V.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.
20. **Messerle V.S., Peregudov V.S.** Ignition and stabilization of combustion of pulverised coal fuels by using thermal plasma // Investigation and Design of Thermal Plasma Technology. London: Cambridge Interscience Publishing, 1995. Vol. 2. P. 323–343.
21. **Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Перегудов В.С.** Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / Под ред. проф. В.Е. Мессерле. Новосибирск: Наука, 1996. 604 с.
22. **Мессерле В.Е., Устименко А.Б.** Плазменное воспламенение и горение твердого топлива. (Научно-технические основы) Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 404 с.
23. **Müller H.** Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung. Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. 1992. № 268. 158 p.
24. **Askarova A.S., Karpenko E.I., Lavrishcheva Y.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.** Plasma-supported coal combustion in boiler furnace // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2007. Vol. 35, No. 6. P. 1607–1616.
25. **Leithner R., Müller H.** CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conf. on Computational Fluid and Solid Mechanics. Cambridge. 2003. P.172–185.
26. **Аскарова А.С., Болегенова С.А., Локтионова И.В., Лаврищева Е.И.** Численное моделирование топочных процессов при горении высокозольного экибастузского угля // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 4. С. 585–595.
27. **Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A.** Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // Fuel Processing Technology. 2013. Vol. 107. P. 93–98.
28. **Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б.** Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 467–476.
29. **Алияров Б.К.** Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. Алматы: Гылым, 1996. 272 с.
30. **Алияров Б.К., Алиярова М.Б.** Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и проблемы. Алматы: Гылым, 2011. 306 с.

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2013 г.,
после доработки — 6 июня 2014 г.*