

ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ ГОРЕНИЯ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ В ТОПКЕ КОТЛА ПК-39-II

В.Е. Мессерле¹, К.А. Умбеткалиев^{1*}, А.Б. Устименко²

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра 172, Алматы, Казахстан

²ТОО «Плазматехника R&D», НИИ Экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Дата поступления:
10 августа 2020

Принято на печать:
21 сентября 2020

Доступно онлайн:
29 сентября 2020

УДК: 66.086.2

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты расчетов плазменного воспламенения и горения угля в топке котла ПК-39-II Рефтинской ГРЭС. Расчеты выполнены с использованием программ кинетических расчетов Plasma-Coal и Cinar ICE. Для математического моделирования процесса сжигания угля в топке котла использовалась трехмерная математическая модель Cinar ICE. Cinar ICE – это программный комплекс для физического моделирования и расчета гидродинамики, теплообмена и горения топлив в объеме топочных устройств. Уравнения сохранения массы и импульса решаются методом контрольных объемов с использованием алгоритма Патанкара. Для описания осредненных во времени уравнений сохранения для газовой фазы используется подход Эйлера. В Эйлеровом подходе частицы интерпретировались как псевдо-газ, т.е. учитывались лишь источник или сток массы, обмен импульсом и энергией. Для моделирования поведения твердой фазы использовался подход Лагранжа, учитывающий динамическое и тепловое отставание частиц, движущихся в потоке. Турбулентность моделируется с помощью стандартной “к-ε” модели турбулентности. Выполнено сравнение результатов расчетов для двух режимов горения пылеугольного топлива, традиционного и с использованием плазменной активации горения угля. Анализ распределения основных характеристик процесса горения показывает, что применение плазменно-топливных систем для растопки котла и стабилизации горения пылеугольного факела положительно влияет на характеристики процесса сжигания, снижая выход NO и мехнедожог топлива как в топочном пространстве, так и на выходе из него. Использование 12 плазменно-топливных систем позволяет понизить температуру сгорания продуктов на выходе топки на 7%, выход оксида азота на 40%, концентрации кислорода на 6% и мехнедожог топлива на 43%.

Ключевые слова: уголь, горение, плазменная активация, плазменно-топливная система, трехмерный расчет, топка котла.

Введение

подавляющее число долгосрочных прогнозов мирового топливного энергетического баланса подтверждают, что уголь останется наиболее значительным из доступных невозобновляемых источников энергии до 2050 г. [1]. По данным [2] мировые запасы

угля оцениваются в 1 трл. тонн. При современном уровне потребления этих запасов хватит на 250 лет. Для сравнения, природного газа хватит на 65 лет, а нефти на 45 лет. Мировое потребление угля возрастает примерно на 2% в год и при этом цены на уголь, в отличие от нефти и газа, отличаются высокой стабильностью [3].

*Ответственный автор
E-mail: kuanush.umbetkaliyev@kaznu.kz (К.А. Умбеткалиев).

Существующие технологии сжигания и термической переработки твердых топлив и их смесей не в полной мере удовлетворяют современным требованиям к повышению эффективности топливоиспользования и обеспечению эколого-экономических показателей энергетических объектов. Сжигание непроектных низкосортных углей в пылеугольных котлах представляет значительные трудности, поскольку низкое качество топлив отрицательно влияет на характеристики процесса воспламенения, стабилизации горения факела и процесса выгорания топлива и, кроме того, существенно снижают эколого-экономические показатели ТЭС, вследствие выброса вредных газов (NO_x , SO_x , CO) и летучей золы [4]. Ситуация обостряется в связи с тем, что снижение качества энергетических углей требует увеличения расхода мазута или природного газа на пылеугольных ТЭС для растопки котлов, подсветки факела и стабилизации выхода жидкого шлака в топках с жидким шлакоудалением [5, 6]. Например, в таких странах как Россия, Казахстан, Украина, Китай на пылеугольных ТЭС ежегодно расходуют более 15 млн. тонн мазута, что экономически неэффективно. Кроме того, продолжающийся рост мирового энергопотребления и, в первую очередь, наиболее ценных видов углеводородного топлива – нефти и газа, и наметившееся при этом истощение их ресурсов, заставляют ученых рассматривать уголь, разведанные запасы которого существенно превышают запасы нефти и газа, основным сырьевым источником в теплоэнергетике и химической промышленности.

Резкое увеличение доли низкосортных топлив в топливно-энергетическом балансе является мировой тенденцией, наиболее проявляющейся в нашей стране. Казахстан имеет огромные запасы энергетических углей, допускающих их добычу дешевым открытым способом, например, Экибастузский каменноугольный бассейн имеет высокую концентрацию запасов высокозольных углей в пластах уникальной мощности (по бассейну в целом около 25 млрд. тонн), пригодных для разработки открытым способом и, следовательно, низкую себестоимость угледобычи [7].

Для улучшения воспламенения и стабилизации горения углей с низким выходом летучих и высокой зольностью в теплоэнергетике используют следующие методы: повышение тонины помола (до $R_{90} = 6-8\%$), высокий подогрев аэросмеси (до 410 К) и вторичного воздуха (до 673 К), подача угольной пыли высокой концентрации (до 50 кг/кг) с последующим подогревом и, наконец, совместное сжигание угля с мазутом [4, 8]. Однако, эти методы обладают существенными недостатками. В частности повышение тонины помола приводит к значительному перерасходу энергозатрат на помол, что уменьшает КПД (нетто) котла. Увеличение температуры аэросмеси выше 410 К и вторичного воздуха выше 673 К невозможно из-за пожароопасности. Совместное сжигание угля и мазута, используемое для растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела, увеличивает механический недожог топлива и повышает выбросы оксидов азота, серы и пятиоксида ванадия, что оказывает существенно негативное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, существующие методы повышения эффективности воспламенения и стабилизации горения пылеугольного факела не удовлетворяют современным эколого-экономическим требованиям. В настоящее время осваиваются новые, прогрессивные, экологически приемлемые технологии топливоиспользования. При этом значительное распространение получили процессы термохимической подготовки углей к сжиганию, в том числе плазменные технологии, характеризующиеся высокой производительностью, экологической чистотой и относительно низкой стоимостью оборудования [9, 10]. Нагрев аэросмеси, представляющей собой смесь угольных частиц с воздухом в камере термopодготовки, может быть осуществлен за счет сжигания газообразного, жидкого или твердого топлива, электродуговой плазмой или другим способом подвода тепловой энергии. Технология термopодготовки должна обеспечить надежную работу при использовании углей различного качества (с различной зольностью, влажностью и выходом летучих). Использование электродуговой плазмы во

многих случаях более эффективно, чем традиционные огневые методы [9]. Плазма с высокой концентрацией энергии характеризуется наличием большого количества химически активных атомов, ионов, радикалов и электронов. Это вызывает многократное ускорение термохимических превращений угля и окислителя и как результат – более полное и быстрое выгорание пылеугольного факела.

1 Численный эксперимент

1.1 Описание методики выполнения трехмерных расчетов Cinar ICE

Для математического моделирования процесса сжигания угля в топке котла использовалась трехмерная математическая модель Cinar ICE [10, 11]. Cinar ICE – это программный комплекс для физического моделирования и расчета гидродинамики, теплообмена и горения топлив в объеме топочных устройств.

Уравнения сохранения массы и импульса решаются методом контрольных объемов с использованием алгоритма Патанкара [12]. Для описания осредненных во времени уравнений сохранения для газовой фазы используется подход Эйлера.

В Эйлеровом подходе частицы интерпретировались как псевдо-газ, т.е. учитывались лишь источник или сток массы, обмен импульсом и энергией. Для моделирования поведения твердой фазы использовался подход Лагранжа [13], учитывающий динамическое и тепловое отставание частиц, движущихся в потоке. Таким образом, для моделирования поведения газовой фазы используется Эйлеров подход, а для описания поведения частиц – Лагранжев подход.

Турбулентность моделируется с помощью стандартной “к-ε” модели турбулентности [14]. “к-ε” модель – модель жесткой вязкостной турбулентности, основанная на гипотезе Бусинеска, применительно к осредненным числам Рейнольдса. Вязкостная турбулентность выражается через турбулентную кинетическую энергию (k) и скорость ее диссипации (ϵ). Таким образом,

применение “к-ε” модели в основной программе требует введения двух дифференциальных уравнений переноса.

Процесс горения описывается в приближении модели «быстрой кинетики» для одновременного расчета смеси из нескольких видов топлив [15], согласно которой скорость реакции лимитируется скоростью перемешивания топлив с окислителем.

Выделение летучих угля описывается единственной реакцией первого порядка [16]. При этом, предполагается, что в целом процесс пиролиза может быть аппроксимирован первым порядком реакции деструкции угольной частицы, протекающей равномерно во всем ее объеме [17]. После выделения летучих в коксовом остатке остаются углерод и инертная зола.

Гетерогенные реакции с углеродом коксового остатка описываются процессами диффузией кислорода к поверхности частицы и химической кинетикой окисления углерода на поверхности частицы [18]. Для учета излучения используется неравновесное приближение [19] с коэффициентами поглощения, рассчитываемыми по модели “двух серых и одного прозрачного газа” [20].

Моделирование образования и восстановления оксидов азота выполняется с использованием так называемой “пост-процессорной” программы. Расчет образования и дальнейших превращений различных соединений азота, содержащегося в исходном угле, а также их общий вклад в образование NO описывается двумя стадиями, не входящими в общую модель горения топлива. В общей модели допускается, что влиянием химических реакций азотсодержащих соединений можно пренебречь. Данное допущение может быть обосновано сравнением содержания образовавшихся в результате процесса оксидов азота с содержанием других продуктов, а также изменения количества тепла при образовании NO. В обоих случаях вкладом NO можно пренебречь.

Основными составляющими NO в топочном объеме являются топливные, термические и быстрые оксиды азота. Расчет топливных оксидов азота описывается моделью Де Созта [21, 22], термических – моделью Савье [23], а быстрых – моделью Леви [24]. Кроме

того, в результате горения угля образуются азот летучих и азот коксового остатка.

Несмотря на то, что влияние азота, содержащегося в коксовом остатке, на образование оксидов азота в рассматриваемой модели сравнительно невелико (порядка 20%), он включен в общую схему образования NO. Методика расчета образования и восстановления NO в результате горения топлива основана на простых химических реакциях [25].

Схема образования термических оксидов азота из азота воздуха, предложенная в работе [23], описывается простыми реакциями первого порядка, основанными на механизме Зельдовича.

Быстрые оксиды азота, как правило, образуются в результате реакции углеводородов с молекулярным азотом в объеме топочной камеры. Так как содержание кислорода в начальной стадии горения сравнительно велико, то в начальной стадии образуются азотистые радикалы, а не молекулярный азот.

1.2 Подготовка исходных данных трехмерного расчета топки котла

Трехмерные расчеты проводились для двухкорпусного котла ПК-39-II Рефтин-

ской ГРЭС. Паропроизводительность одного корпуса котла составляет 475 т/ч при общей мощности энергоблока – 300 МВт. Для численного моделирования топки использовалась вычислительная сетка размером: $24 \times 60 \times 106$, что составило 152640 контрольных объемов. На рис. 1 представлен общий вид топочной камеры котла ПК-39-II и деление ее на контрольные объемы.

Топка одного корпуса котла оборудована 12 вихревыми трехканальными горелками. Горелки расположены в два яруса по 6 горелок в каждом на противоположных стенках топки с фронта и тыла. Котел ПК-39-II предназначен для сжигания Экибастузского каменного угля зольностью 42,7%. В таблице 1 представлены используемые для трехмерного расчета исходные данные для одного корпуса котла ПК-39-II Рефтинской ГРЭС.

Согласно технологии плазменного воспламенения угля, основанной на частичной газификации пылеугольного топлива [26] топка котла оснащается плазменно-топливными системами (ПТС). Основным элементом ПТС является плазмотрон. На рис. 2 показан плазмотрон и схема его установки на простейшая ПТС, представляющей собой прямоточную пылеугольную горелку.

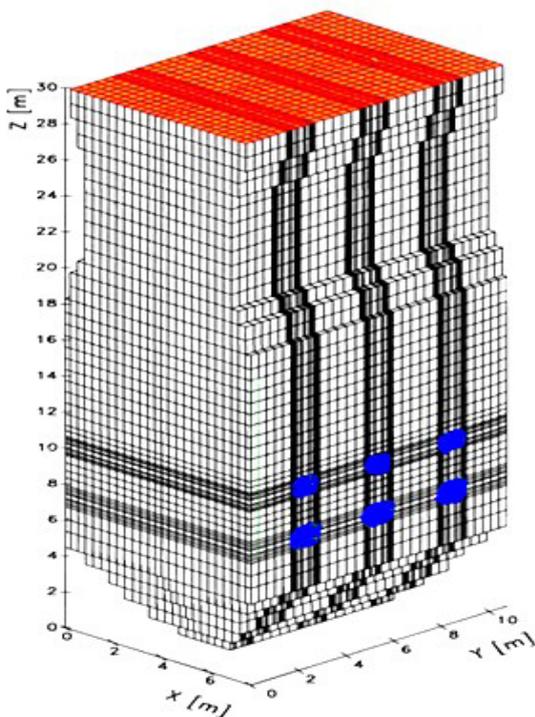


Рис. 1. Общий вид топочной камеры котла ПК-39-II и деление ее на контрольные объемы.

Плазмотрон располагается на начальном участке ПТС. Электрическая дуга формируется в нем между электродами, анодом и катодом. Плазмообразующий газ (воздух) продувается через электроды, формируя плазменный факел, среднemasсовая температура которого варьируется в интервале 5000–6000 К. Мощность плазмотрона изменяется от 100 до 350 кВт.

Технология ПТС заключается в нагреве аэросмеси с помощью плазменного факела до температуры выделения летучих и частичной газификации углерода коксового остатка. Таким образом, независимо от качества исходного угля из аэросмеси получается высокорреакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ и коксовый остаток).

Таблица 1

Характеристика топочной камеры котла ПК-39-II

№ п/п	Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
1	Расход топлива на котел	кг/час	B	83000
2	Расход топлива на горелку	кг/час	B _б	6916
3	Химический состав Экибастузского каменного угля (органическая масса угля)	масс. %	C	43,7
H			2,9	
O			6,57	
N			0,78	
S			0,45	
4	Теплота сгорания угля	МДж/кг	Q _{wL}	16
5	Зольность угля	%	A _c	42,7
6	Выход летучих	%	V _F	26
7	Влажность угля	%	W _p	3,25
8	Средний диаметр угольных частиц	мкм	d _{par}	74
9	Высота топки	м	z(H)	28,80
10	Ширина топки	м	y	10,84
11	Глубина топки	м	x	7,84
12	Тип используемых горелок		Вихревые	
13	Количество горелок на котле	шт	N _г	12
14	Температура первичного воздуха	°С (К)	t _{п.в.}	160(433)
15	Температура вторичного воздуха	°С (К)	t _{вт.в.}	334(706)
16	Расход первичного воздуха на горелку	м ³ /час	V _{п.в.}	10893,6
17	Расход вторичного воздуха на горелку	м ³ /час	V _{вт.в.}	59040,0
18	Скорость первичного воздуха на горелку	м/с	v _{п.в.}	10,7
19	Скорость вторичного воздуха на горелку	м/с	v _{вт.в.}	40,0
20	Площадь поперечного сечения канала аэросмеси в горелке	м ²	F _а	0,178
21	Площадь поперечного сечения канала вторичного воздуха в горелке	м ²	F _{вв}	0,656
22	Присосы в топку		Δα _T	0,05
23	Коэффициент избытка воздуха за топкой		α _T	1,2
24	Гидродинамическое сопротивление канала аэросмеси горелки	мм.в.ст	Δ P	114

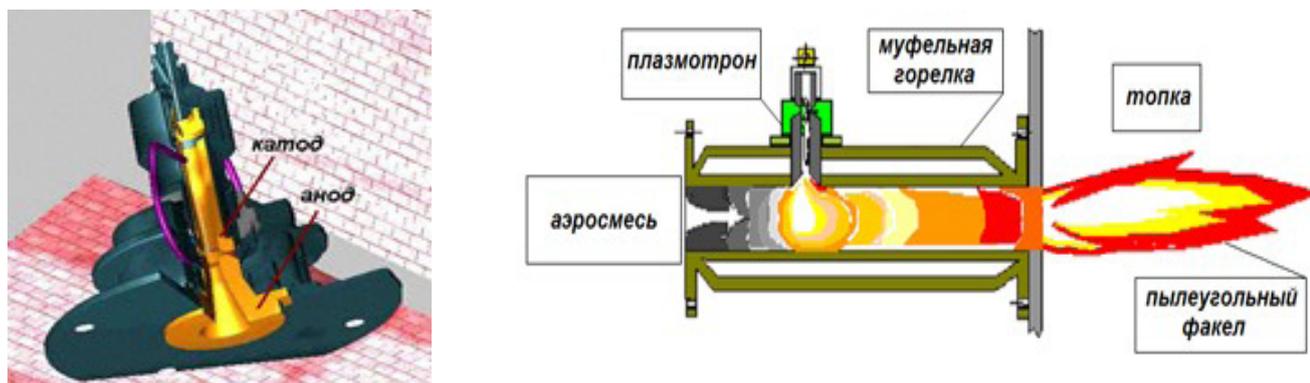


Рис. 2. Плазматрон и схема его установки на прямооточной ПТС.

Таблица 2

Результаты расчетов ПТС в ее выходном сечении

CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂	C ₂ H ₂	X _c , %	V _g , м/с	T _g , К	t _g , с
Объемные %										
13,5	3,48	0,07	5,93	5,36	71,32	0,34	86	193	891	0,007

Смешиваясь с вторичным воздухом в топке котла, оно интенсивно воспламеняется и стабильно горит без использования дополнительного топлива (мазут или природный газ), традиционно сжигаемого для растопки котлов из холодного состояния и стабилизации горения факела низкосортного энергетического угля.

2 Результаты численных экспериментов

С помощью программы Plasma-Coal [27] были найдены исходные данные для проектирования топки котла ПТС. Расчеты были выполнены для цилиндрической прямооточной горелки, оборудованной плазматроном мощностью 100 кВт. Диаметр горелки – 0,273 м, температура стенки – 700 К. Средний диаметр угольных частиц составлял 74 мкм. Температура исходной аэросмеси на входе в ПТС была 433 К. Расход угля через ПТС – 4,8 т/ч. В расчетах принят тепловой КПД плазматрона, равный 90%. Данные, полученные для выходного сечения ПТС, были взяты в качестве исходных параметров для трехмерного расчета топки энергетического котла, оборудованного 4, 6 и 12 ПТС (таблица 2).

На рисунках 3–5 показаны распределения полей температур и концентрации оксида азота в различных сечениях топки традиционного режима горения угля в топке котла ПК-39-II.

Из рисунка 3 видно, что осредненная температура имеет характерные максимумы в области обоих ярусов горелок и достигает максимального значения в 1250 °С на высоте 14 м.

На выходе топки профиль температуры имеет характерные экстремумы (два максимума и три минимума), связанные с симметричным двусторонним расположением пылеугольных горелок.

Как следует из рисунка 4, в ярусе горелок не наблюдается общее ядро факела, которое формируется на высоте 10 м и более (рис. 4а). На выходе из топки (рис. 4б) максимальная температура достигает 1137 °С. Максимальные концентрации оксидов азота достигают 431 ppm в нижнем ярусе горелок (рис. 5а) и 283 ppm на выходе из топки (рис. 5б) при средних значениях 216 и 233 ppm соответственно.

На рисунках 6–8 показаны поля температур в топке одного корпуса котла ПК-39-II, оснащенной 4, 6 и 12 ПТС.

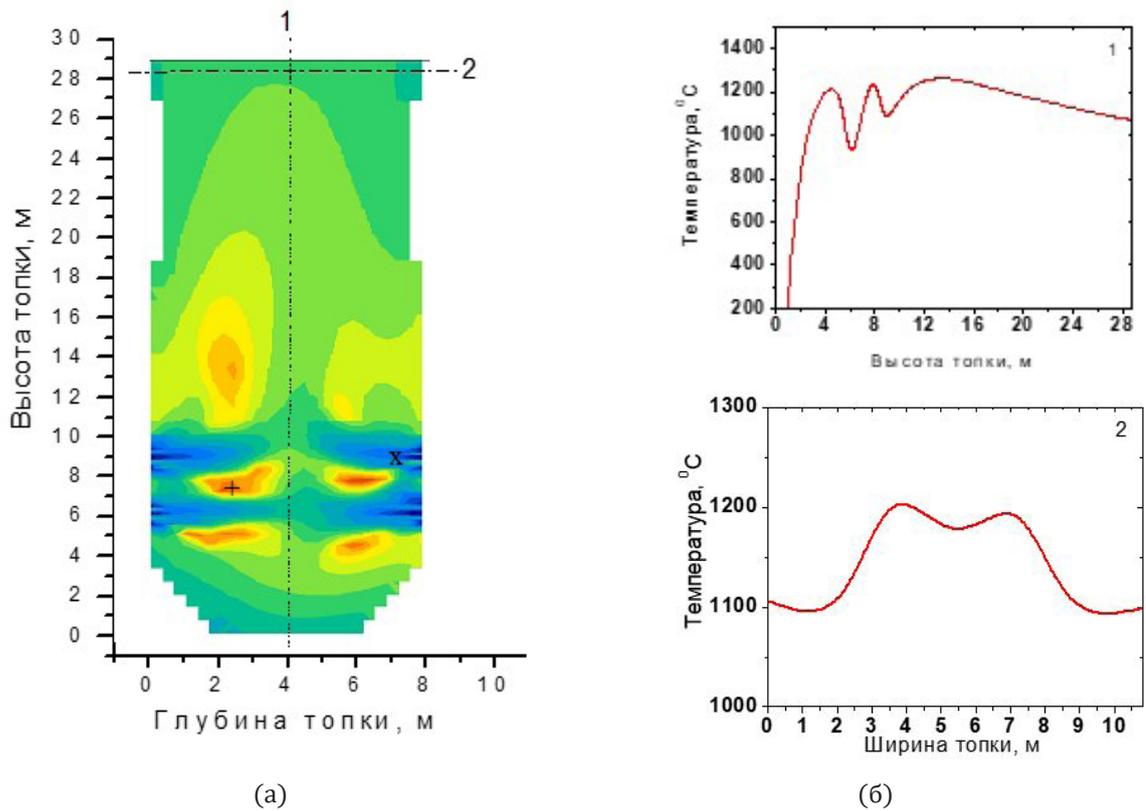


Рис. 3. Поле температур по высоте топки (а) и распределение осредненной температуры по высоте и ширине топки (б).

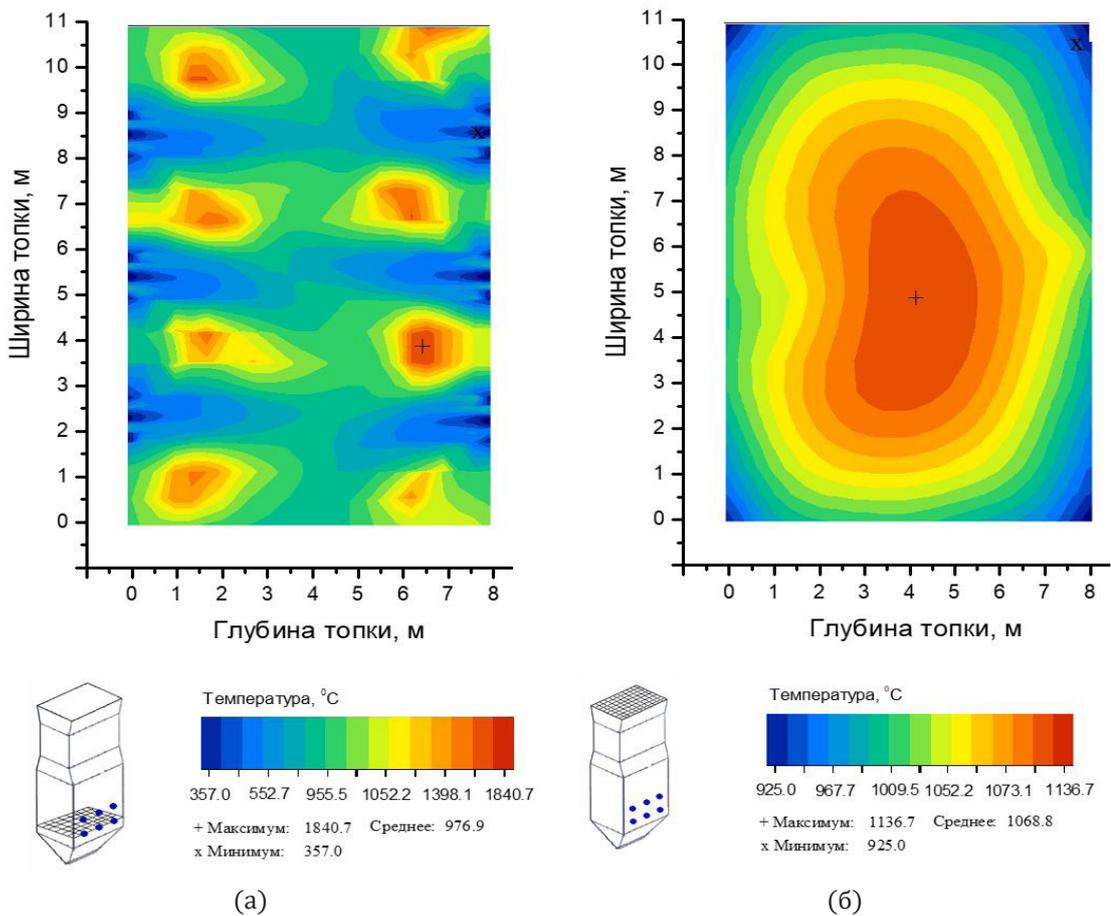


Рис. 4. Поле температур на уровне горелок нижнего яруса горелок (а) и на выходе топки (б).

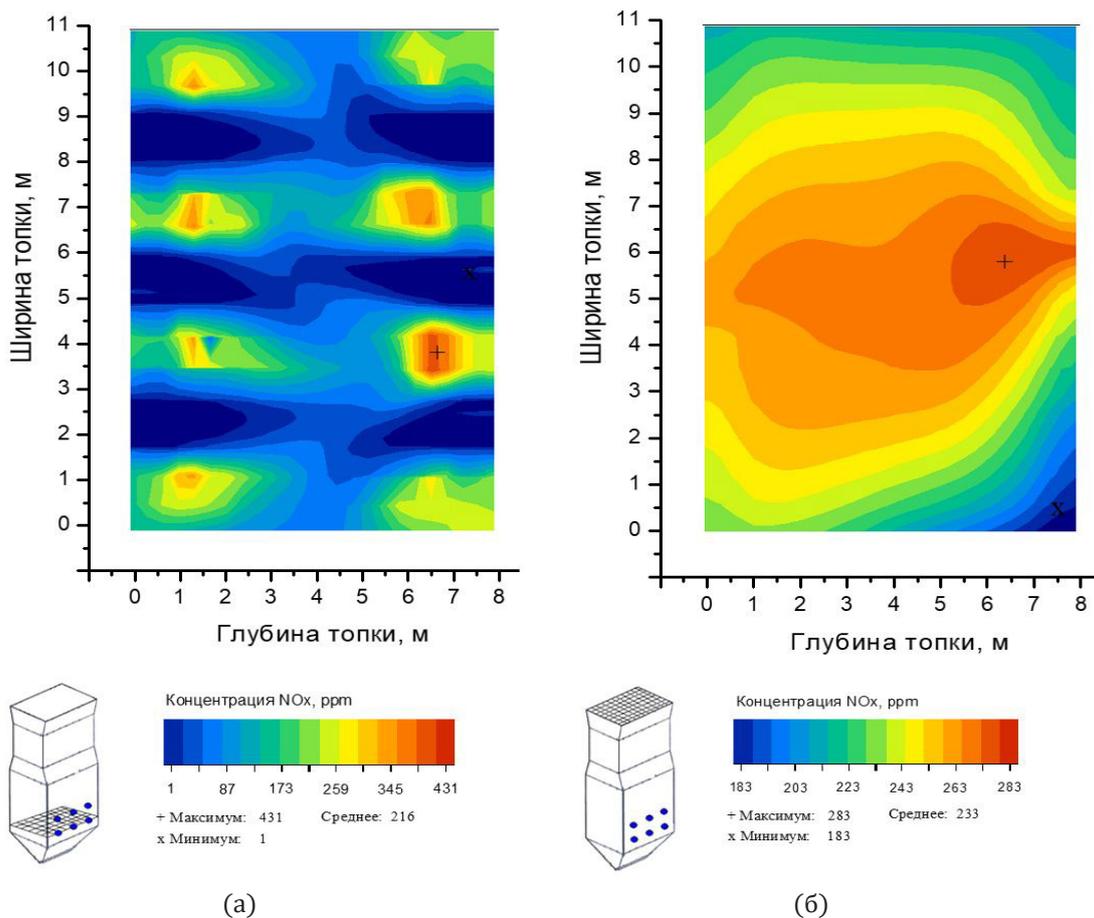


Рис. 5. Поле концентраций оксида азота на уровне нижнего яруса горелок (а) и на выходе топki (б).

Как видно из сравнения рисунков 4 и 6, поля температур по высоте топki и распределения осредненной температуры по высоте и ширине топki качественно подобны для двух режимов горения, традиционного и с ПТС. Однако, горение частично газифицированного в ПТС топлива характеризуется определенными отличиями.

Экстремумы температурной кривой по ширине топki (рис. 6б) более выражены. При этом минимальная осредненная температура на оси топki составляет 1150 °С, что на 20 градусов ниже, чем при традиционном сжигании угля (рис. 4). Отметим, также, что максимальное осредненное значение составляет 1180 °С, что на 30 градусов ниже, чем при традиционном сжигании угля. Эти факты свидетельствуют о более раннем воспламенении и, соответственно, выгорании частично газифицированного топлива с использованием ПТС.

Из сравнения рисунков 5 и 7 видны качественные различия в полях температур на уровне горелок нижнего яруса. В частности,

на рисунке 7 видно, что из 4 горелок, оснащенных плазмотронами, в топку выходят 4 факела с максимальной температурой 1664 °С, тогда как при традиционном сжигании угля в топку выходит холодная аэрозоль с температурой 357 °С.

На рисунке 8 показано поле температур в топке на уровне горелок верхнего яруса, оснащенной 6 и 12 ПТС. Видно, что пылеугольные потоки из шести горелок (рис. 8а) и факела от 6 ПТС верхнего яруса (рис. 8б) охватываются горячими конвективными потоками двухкомпонентного высокорекреакционного топлива от шести ПТС, установленных в нижнем ярусе. Последний факт свидетельствует об интенсификации процесса горения угля при использовании ПТС.

На рисунке 9 показано изменение по высоте топki осредненных температур, рассчитанных для четырех вариантов сжигания угля: традиционного и с его предварительной плазменной активацией с использованием 4, 6 и 12 ПТС.

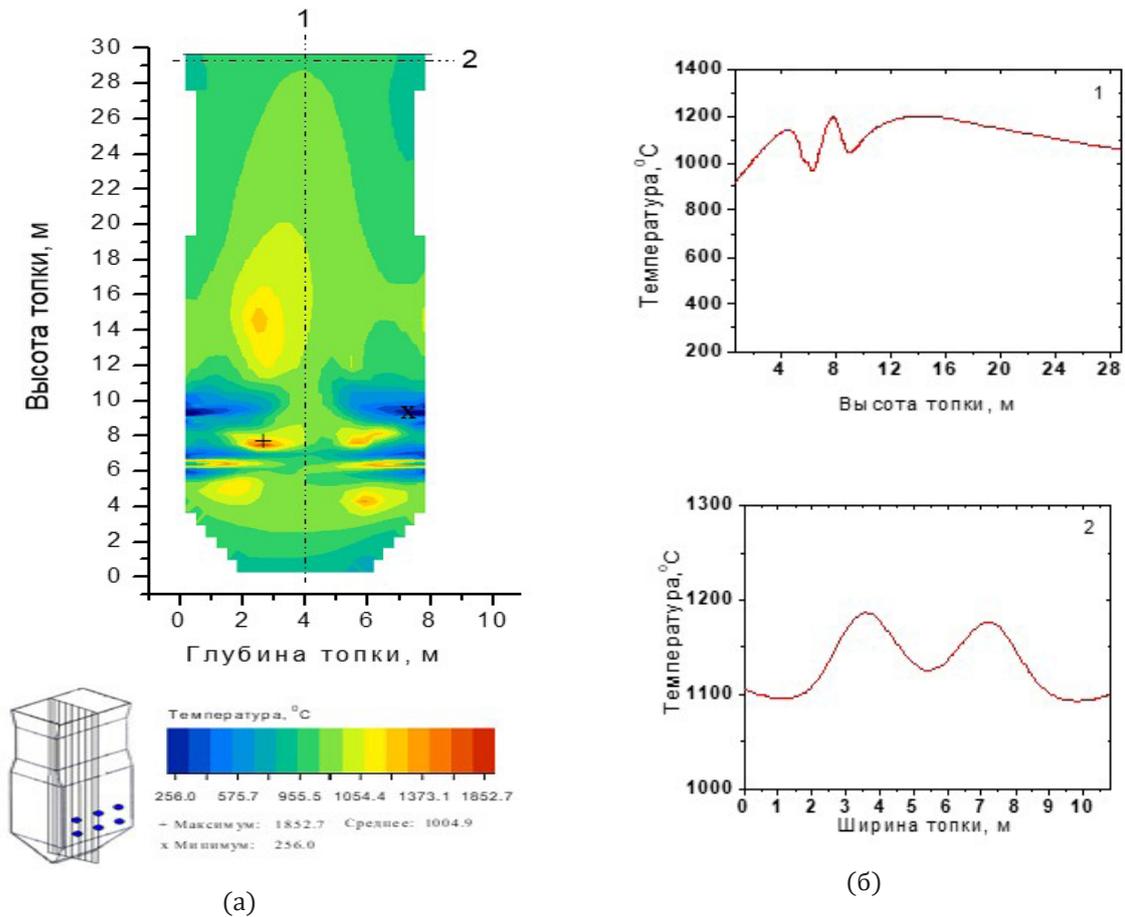


Рис. 6. Поле температур по высоте топки (а) и распределение осредненной температуры по высоте и ширине топки (б), оснащенной 4 ПТС.

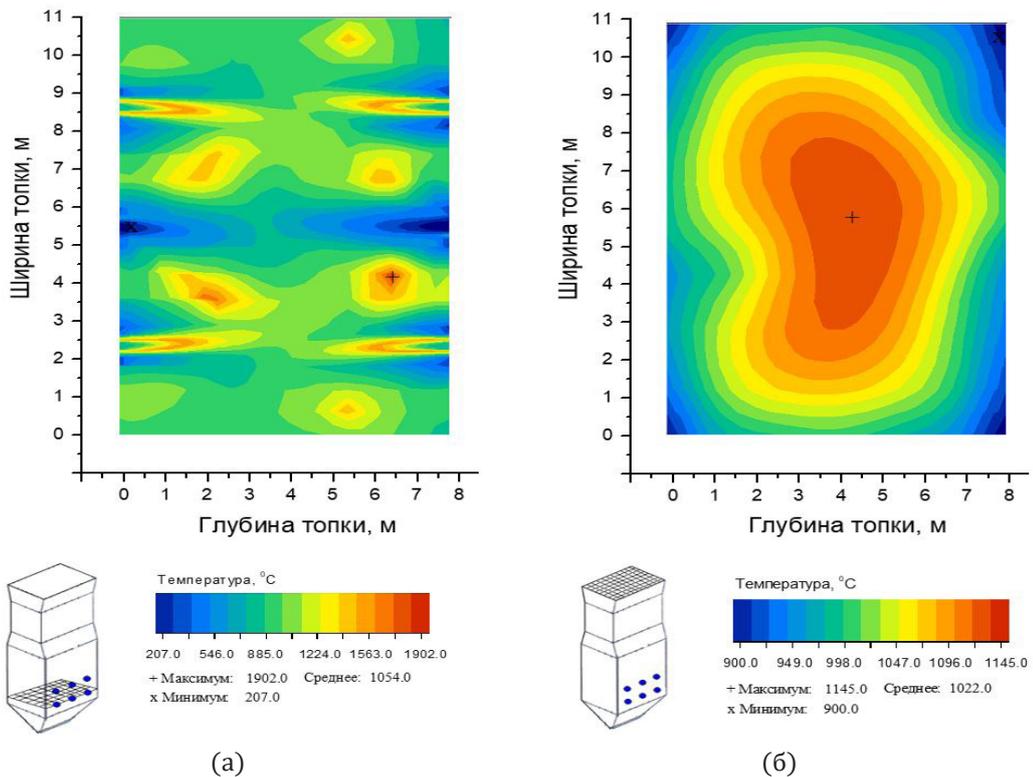


Рис. 7. Поле температур на уровне горелок нижнего яруса (а) и на выходе топки (б) оснащенной 4 ПТС.

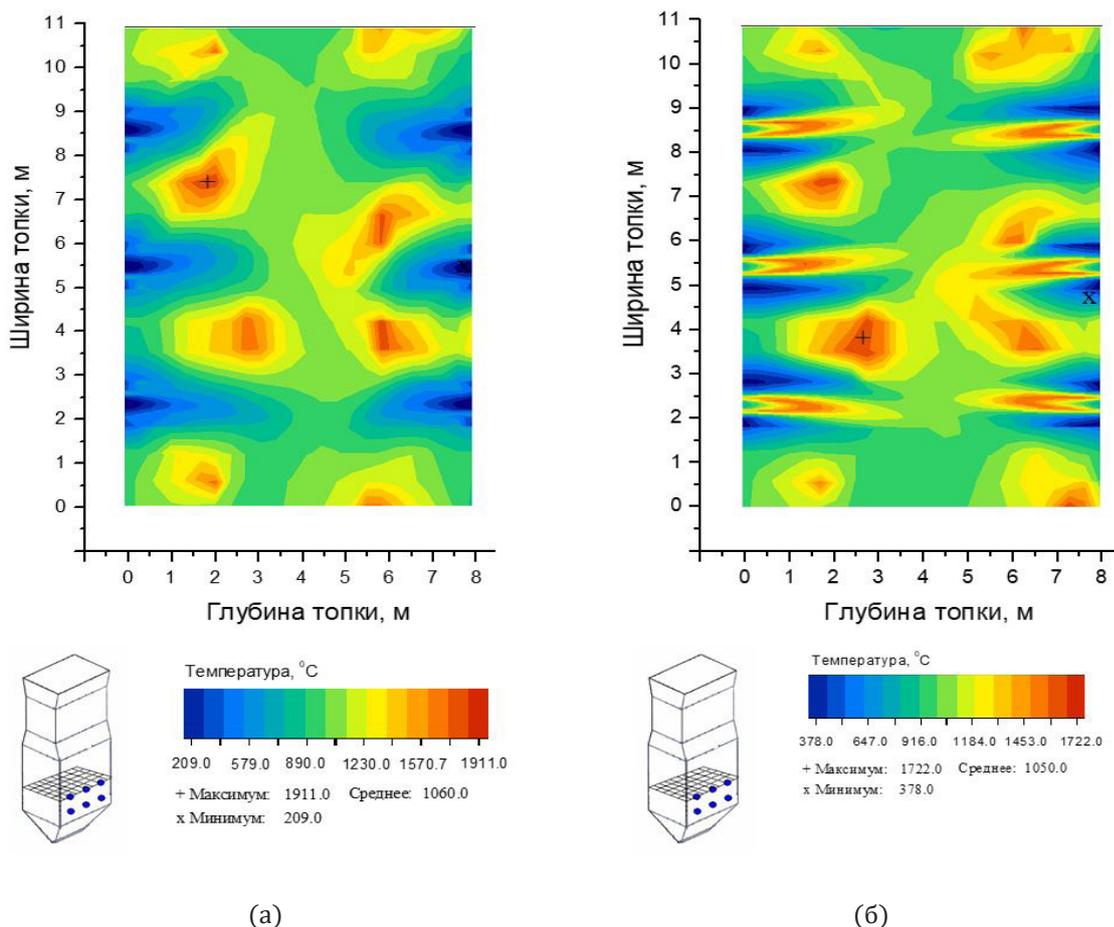


Рис. 8. Поле температур на уровне горелок нижнего яруса (а) и на выходе топки (б) оснащенной 4 ПТС.

Видно, что в основном температуры по высоте топки, рассчитанные для активированного плазмой горения, ниже температур, рассчитанных для традиционного режима сжигания угля. Однако есть зона, в которой температура продуктов сгорания угля с плазменной активацией выше. Эта зона – нижняя часть топки до уровня верхнего яруса горелок. Это явление может быть объяснено влиянием ПТС. Технология ПТС заключается в нагреве аэросмеси с помощью плазменного факела до температуры выделения летучих и частичной газификации углерода коксового остатка. Таким образом, независимо от качества исходного угля из аэросмеси получается высокорреакционное двухкомпонентное топливо. Смешиваясь с вторичным воздухом в топке котла, оно интенсивно воспламеняется и стабильно горит без использования дополнительного топлива (мазут или природный газ), традиционно сжигаемого для растопки котлов из холод-

ного состояния и стабилизации горения факела низкосортного энергетического угля. Таким образом, использование ПТС обеспечивает более быстрый нагрев и раннее воспламенение аэросмеси и соответствующее смещение фронта горения к выходу ПТС.

На рисунке 10 показаны распределения концентрации оксидов азота, рассчитанные также для 4 режимов сжигания угля. Из рисунка видно различие между традиционным режимом работы топки и с плазменной активацией аэросмеси в ПТС. Средние значения концентрации NO по высоте топки заметно ниже в случае сжигания частично газифицированного в ПТС угля. Как при традиционном сжигании угля, так и с использованием ПТС максимальная концентрация NO наблюдается в верхней части топки (на высоте 16–28 м). Интересно, что использование ПТС снижает концентрацию NO по всей высоте топки и даже ниже уровня расположения ПТС (на высоте 0–6 м). Это

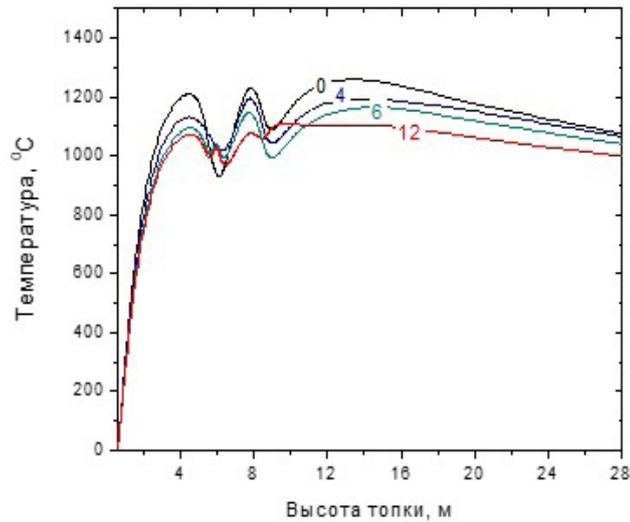


Рис. 9. Изменение осредненных температур по высоте топки: 0, 4, 6, 12 – традиционный режим работы топки и с плазменной активацией 4, 6 и 12 ПТС соответственно.

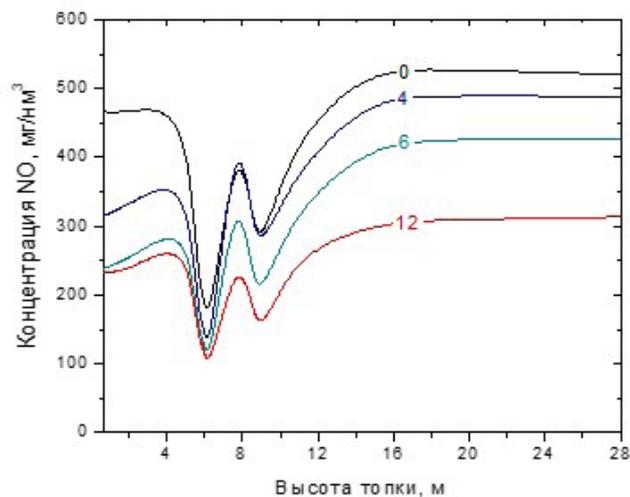


Рис. 10. Изменение средних значений концентрации NO по высоте топки: 0, 4, 6, 12 – традиционный режим работы топки и с плазменной активацией 4, 6 и 12 ПТС соответственно.

явление объясняется подавлением образования топливных оксидов азота внутри ПТС. Топливный азот выделяется в газовую фазу вместе с летучими при нагреве угля в объеме ПТС при существенном дефиците кислорода (коэффициент избытка воздуха 0,3–0,4). Поэтому из топливного азота образуется преимущественно молекулярный азот, из которого возможно образование только термических оксидов азота, составляющих лишь 10–15% от общего количества NO на выходе из топки.

На рисунках 11 и 12 показаны распределения по высоте топки средних значений концентраций кислорода и мехнедожога топлива, характеризующих эффективность сжигания угля. Средние значения концентрации кислорода по всей высоте топки ниже в случае горения угля, прошедшего предварительную термохимическую подготовку в ПТС, а средние значения концентраций диоксида углерода, соответственно, будут выше. Эти данные подтверждают известный экспериментальный факт, что когда плазменно-топливные системы под-

держивают процесс горения угля, наблюдается более полное его сгорание и снижение мехнедожога топлива [9]. В частности, из рисунков 11 и 12 видно, что при работе 12 ПТС концентрация кислорода и мехнедожог топлива снижаются на 8 и 40% соответственно, по сравнению с традиционным сжиганием угля.

В таблице 2 приведены результаты расчетов четырех сравниваемых вариантов, традиционного горения угля и горения угля, поддерживаемого плазмой с помощью 4, 6 и 12 ПТС. Как видно из таблицы, при рабо-

те ПТС температура продуктов сгорания на выходе из топки снижается по сравнению с традиционным режимом сжигания угольной пыли. В частности, при работе 12 ПТС это снижение составляет 7%. Влияние плазменно-топливных систем на горение угля (в случае работы 12 ПТС) проявляется также в снижении концентрации оксидов азота (на 40%), концентрации кислорода (на 6%) и мехнедожога топлива q_4 (на 43%). Данное сравнение показывает, что плазменная активации горения угля повышает основные показатели процесса.

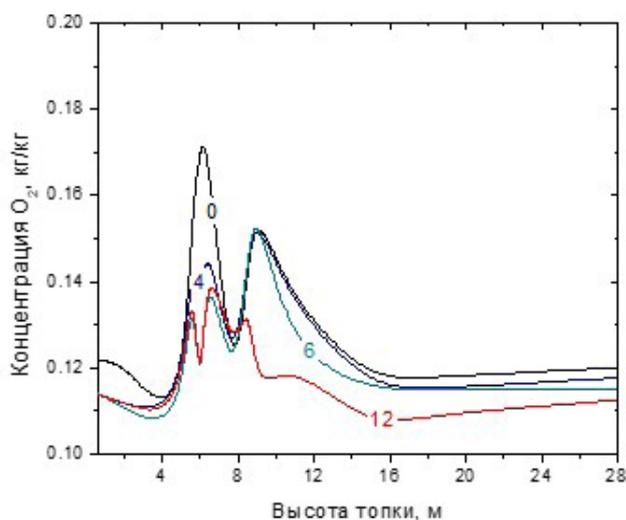


Рис. 11. Изменение средних значений концентраций кислорода по высоте топки: 0, 4, 6, 12 – традиционный режим работы топки и с плазменной активацией 4, 6 и 12 ПТС соответственно.

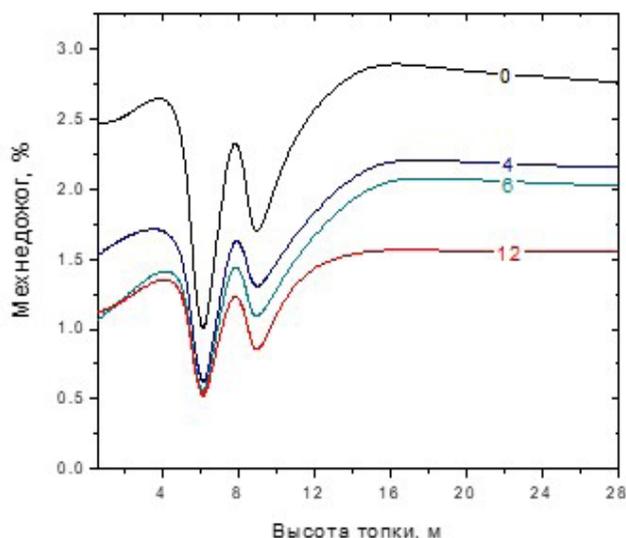


Рис. 12. Изменение осредненных значений мехнедожога топлива по высоте топки: 0, 4, 6, 12 – традиционный режим работы топки и с плазменной активацией 4, 6 и 12 ПТС соответственно.

Таким образом, анализ распределения основных характеристик процесса горения показывает, что применение ПТС для растопки котла и стабилизации горения пылеугольного факела положительно влияет на характеристики процесса сжигания, снижая выход NO и мехнедожог топлива как в топочном пространстве, так и на выходе из него. Кроме того, применение ПТС позволяет оптимизировать процесс сжигания низкосортных углей за счет их частичной газификации.

Заключение

Проведены расчеты плазменного воспламенения и горения Экибастузского каменного угля, зольностью 42,7% в топке котла ПК-39-II Рефтинской ГРЭС с использованием программы кинетических расчетов Plasma-Coal и программы трехмерных расчетов Cinar ICE. Выполнено сравнение результатов расчетов для двух режимов горения пылеугольного топлива, традиционного и с использованием плазменной активации горения угля. Показано, что применение плазменно-топливных систем для активации горения твердого топлива позволяет оптимизировать процесс горения угля в топочной камере. Использование 12 плазменно-топливных систем позволяет понизить температуру сгорания продуктов на выходе топки на 7%, выход оксида азота на 40%, концентрации кислорода на 6% и мехнедожог топлива на 43% и, соответственно повысить эколого-экономические показатели пылеугольных котлов.

Литература

[1]. BP Energy Outlook 2035. February 2015. BP p.l.c., 2015. 98 p. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2015/bp-energy-outlook-2035-booklet.pdf>

[2]. Key World Energy Statistics 2012: International Energy Agency. OECD/IEA, Paris, 2012. – 80 p. www.iea.org

[3]. Key World Energy Statistics 2011 Edition,

International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, 2011. – 80 p www.iea.org

[4]. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Coal Combustion: Plasma-Assisted. In Encyclopedia of Plasma Technology. Edited by J. Leon Shohet. CRC Press 2016. Published: 07 Feb 2017. P. 269–283. Print ISBN: 978-1-4665-0059-4; eBook ISBN: 978-1-4822-1431-4. <https://doi.org/10.1081/E-EPLT-120053800>

[5]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: Numerical modeling and full-scale test // Fuel, 2014. – V. 126. – P. 294–300.

[6]. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. / Под ред. академика РАН Фортובה, В.Е. — М.: Наука. 2000. Т.4. – С.359–370.

[7]. V.E.Messerle, A.B.Ustimenko. Plasma-assisted ignition and combustion of pulverized coal // Scientific Program & Book of Abstracts of the 11th International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, Montegrotto Terme, Italy, July 1-5, 2018. – P. 49.

[8]. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменное воспламенение и горение твердого топлива. (Научно-технические основы). // Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing (ISBN: 978-3-8473-9845-5), 2012. – 404 с.

[9]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // Fuel Processing Technology, March 2013. – V. 107. – P. 93–98.

[10]. Lockwood F.C., Mahmud T., Yehia M.A. Simulation of pulverised coal test furnace performance // Fuel, 1998. – V. 77, No.12. – P. 1329–1337.

[11]. Lockwood F.C., Saloja A.P. and Syed S.A. A Prediction Method for Coal Fired Furnaces. // Combustion and Flame, 1980. – V. 38. – P. 1–15.

[12]. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow, Taylor & Francis. London, 1980.

[13]. Levy J.F. Prediction of Flows, Combustion and Heat Transfer in Coal Fired Cement Kilns,

- Ph.D. Thesis, University of London, London, 1991.
- [14]. Jones W.P., Launder B.E. The Prediction of Laminarization with a Two-equation model of Turbulence // *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1972. – V. 15, No.2. – P. 301–314.
- [15]. Kandamby N.H., Lazopoulos G., Lockwood F.C., Perera A., Vigerano L. // *Proceedings of the ASME IJPGC Conference, Huston, Texas, October 1996*.
- [16]. Anthony D.B., Howard J.B. Coal Devolatilisation and Hydro-gasification, *A.I.Ch.E Journal*, 1976. – V. 22, No. 4.
- [17]. Badzioch S. and Hawkesley P.G.W. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverised Coal Particles, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 1970. – V. 9, No. 4.
- [18]. Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W. *Combustion of Pulverised Coal*, BCURA, England, Publisher: Cheney & Sons Ltd, England, 1968.
- [19]. Arscott J.A., Gibb J., Jenner R. *European Symposium, The Combustion Institute, Sheffield, 1973*.
- [20]. Trulove J.S. *A Mixed Grey Gas Model for Flame Radiation*, AERE HARWELL R-8494, 1976.
- [21]. DeSoete G.G. // *Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen* // *Proceedings of the 15th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1975. – P. 1093.
- [22]. DeSoete G.G. // *Heterogeneous N₂O and NO Formation from Bound Nitrogen Atoms during Coal Char Combustion* / *Proceedings of the 23rd Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990. – P. 1257.
- [23]. Sawyer R.F. // *The Formation and Destruction of Pollutants in Combustion Processes: Clearing the Air on the Role of Combustion Research* // *Proceedings of the 18th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1981. – P. 1.
- [24]. Levy J., Chan L., Sarofim A. and Beer J. *NO/Char Reactions at Pulverised Coal Flame Conditions*, *Proceedings of the 19th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1981. – P. 111.
- [25]. Dimitriou D., Kandamby N.H. and Lockwood F.C. *A Mathematical Modelling Technique for Gaseous and solid Fuel Reburning in Pulverised Coal Combustors* // *Fuel*. – 2003. – V. 82, No.15–17. – P. 2107–2114.
- [26]. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Umbetkaliev K.A. *Plasma ignition of dust-coal flame* // *Горение и плазмохимия*, 2019. – Т.17, №1. – С. 14–22.
- [27]. Gorokhovskii M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. *Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory*. // *Journal of the Energy Institute*, 2005. – V. 78, N 4. – P. 157–171.

3D-calculation of plasma assisted Ecibastuz coal combustion at reftinsk PK-39-II furnace boiler

V.E. Messerle¹, K.A. Umbetkaliev¹, A.B. Ustimenko²

¹Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay batyr st., Almaty, Kazakhstan

²Plasmatechnics R&D LLP, Institute of Experimental and Theoretical Physics of al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Results of calculations of plasma-assisted coal ignition and combustion in a furnace of PK-39-II boiler at Reftinsk District Power Plant are considered in this paper. The calculations fulfilled using Plasma-Coal and Cinar ICE kinetic calculation codes. For mathematical modeling of coal combustion process in a furnace boiler, a 3D mathematical Cinar ICE model has been used. Cinar ICE is computer-based program for physical modeling and calculation of hydrodynamics, heat and mass transfer and fuels combustion in furnaces. Equations for mass and momentum conservation are solved by the volume control method using Patankar algorithm. For gas phase to describe time-average conservation equations Euler approach

has been used. In Euler approach particles interpreted as a pseudo-gas, i.e., considered only source or mass flow, momentum and energy exchange. To simulate behavior of a solid phase, Lagrange approach is used. It takes into account the dynamic and thermal delay of particles, moving in a flow. Standard k- ϵ model of turbulence is used to describe turbulence. Two regimes of pulverized coal combustion were calculated and compared, traditional one and plasma-assisted coal combustion regime. It is showed that using plasma-fuel systems to activate solid fuel combustion allows optimizing coal combustion in the furnace boiler. Analysis of main characteristics of the process of combustion shows that application of plasma-fuel systems for furnace start-up and stabilization of combustion of the pulverized coal flame has a positive effect on the characteristics of combustion process, reducing NO emission and unburned carbon both in combustion space and at the outlet. Using of 12 plasma-fuel systems allows reducing at the outlet of furnace, combustion product's temperature by 7%, NOx emission by 40%, oxygen concentration by 6% and unburned carbon by 43%.

Key words: coal, combustion, plasma activation, plasma-fuel system, 3D-calculation, furnace boiler.

ПК-39-II қазан оттығында Екібастұз көмірінің өртеудің плазмалы активтендірудің үшөлшемді есептеу

В.Е. Мессерле¹, К.А. Умбеткалиев¹, А.Б. Устименко²

¹Жану проблемалар институты, Алматы, Қазақстан

²ЖШС «Плазматехника R&D», Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-ның Эксперименталды және теоретикалық физика ҒЗИ, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Мақалада Рефтинск ҚАЭС-нің қазан оттығында көмірді плазмалық тұтандыру мен өртенудің есептеу нәтижелері келтірілген. Есептеулер кинетикалық есептеулерге арналған Plasma-Coal және Cinar ICE бағдарламалар көмегімен орындалды. Көмірді қаза ошағында өртеу процесін математикалық модельдеу үшін үшөлшемді Cinar ICE математикалық моделі қолданылды. Cinar ICE. Cinar ICE – бұл оттық құрылғы көлемінде отындарды өртеу, жылу масса алмасу және гидродинамиканы физикалық модельдеуге және есептеуге арналған бағдарламалық кешені. Масса және импульс сақталу теңдеулері Патанкар алгоритммен орындалатын бақылаушы көлемдер әдіс көмегімен орындалады. Газды фазасы үшін уақыт бойынша орташаланған теңдеулерді сипаттау үшін Эйлер тәсілі қолданылады. Эйлер тәсілінде бөлшектер жалған газ ретінде қарастырылады, яғни тек масса көзі немесе ағыны, импульс және энергияның алмасуы ескеріледі. Қатты фазасының ретін модельдеу үшін ағында қозғалатын бөлшектердің динамикалық және жылулық артта қалуын ескеретін Лагранж тәсілі қолданылды. Турбуленттік стандартты «k- ϵ » турбуленттік моделі арқылы модельденеді. Шаңкөмірлі отынның екі жану режимдер бойынша есептеу нәтижелерінің салыстыру орындалған, дәстүрлі және көмірді өртеу үшін плазмалық активтендіру. Қатты отынның жану процесін активтендіру үшін плазмалы-отынды жүйелерді қолдану жану камерада

көмірдің өртенуін оңтайландыруға мүмкіндігін беретінің көрсетілген. Жану процесінің негізгі сипаттамалар таралуының талдау нәтижесінде, плазмалы-отынды жүйелерді қазандықтарды жылуға және шаңкөмірлі жалынының жануын тұрақтандыру үшін жану процесінің сипаттамаларына оң әсерін береді, және қазан кеңістігінде және оның шығу аймағында NO мен отынның мехөртеңбеуің төмендетеді. 12 плазмалы-отынды

жүйелерді пайдалану нәтижесінде қазандықтан шығатын өнімдердің жану температурасын 7%-ға, азот оксидтерінің тастауларын 40%-ға, оттегі концентрациясын 6%-ға және отынның мехөртеңбеуің 43 %-ға төмендетуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: көмір, жану, плазмалы активтендіру, плазмалы-отынды жүйе, үшөлшемді есептеу, қазан оттығы.