

УДК 536.46:532.517.4

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

<sup>1</sup>Аскарлова А.С., <sup>2</sup>Мессерле В.Е., <sup>2</sup>Устименко А.Б., <sup>1</sup>Болегенова С.А.,  
<sup>1</sup>Максимов В.Ю., <sup>1</sup>Бекмухамет А.

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной  
и теоретической физики, г. Алматы

В настоящее время в Казахстане около 85% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), основным топливом которых является уголь. Более 80% угля, сжигаемого на этих ТЭС, является низкосортным, например экибастузский уголь, зольность которого составляет около 50%. Сжигание низкосортных углей сопряжено со сложностями по их воспламенению, увеличением вредных пылегазовых выбросов (зола, оксиды углерода, пятиокись ванадия, оксиды азота и серы, углеводороды). При сжигании таких низкосортных углей увеличивается расход мазута или природного газа, используемого для розжига, и ухудшается экологическая обстановка.

В мировой практике принято обогащать угли перед их сжиганием. Однако, нельзя ожидать обогащения углей в объемах, необходимых для ТЭС Казахстана, особенно из-за большой стоимости обогащения. Кроме того, в результате обогащения можно снизить зольность и влажность углей, тогда как увеличить выход летучих (тощие угли, антрацит имеют выход летучих 4-12%) путем обогащения невозможно.

Для улучшения воспламенения и стабилизации горения низкосортных углей с низким выходом летучих и высокой зольностью существуют дополнительные мероприятия, которые в основном сводятся к утонению помола (до  $R_{90}=6-8\%$ ), подогреву аэросмеси (до  $150^{\circ}\text{C}$ ) и вторичного воздуха (до  $400^{\circ}\text{C}$ ), подаче угольной пыли высокой концентрации (до 50 кг/кг) с последующим разбавлением и к совместному сжиганию с углем мазута или природного газа. Все перечисленные мероприятия обладают существенными недостатками, снижающими эффективность топлива использования и надежность работы котлоагрегатов электростанций с одновременным ухудшением их экологических показателей.

Перспективным техническим решением проблемы является плазменная технология термохимической обработки углей, которая основана на электродуговой активации пылевидного угля в процессе его газификации. Она заключается в нагреве аэросмеси (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной или полной газификации коксового остатка с модификацией минеральной массы угля. При этом горючий газ и коксовый остаток используется в качестве энергетического топлива при его подаче в топку котла. С помощью этого топлива осуществляется безмазутная растопка пылеугольных котлов и стабилизация горения пылеугольного факела.

С применением плазменной активации пылеугольного потока входные параметры, используемые при расчетах, существенно отличаются от существующих

щих на практике при организации горения без плазменных систем. В камеру сгорания поступает факел реагирующей топливной смеси, что может вызвать 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. Несмотря на широкое исследование плазменных технологий комплексное исследование влияния термохимической активации на процессы, происходящие непосредственно в камере горения, после того как активированные потоки поступают в топочное пространство, ранее не проводилось.

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 далее рассчитать характеристики процессов тепломассопереноса в объеме камеры сгорания котла ТЭС. Использование новейших информационных технологий моделирования позволили, при хорошо развитом алгоритмическом и программном обеспечении, используя соответствующие модели, провести вычислительные эксперименты по численному моделированию этих процессов [1, 2].

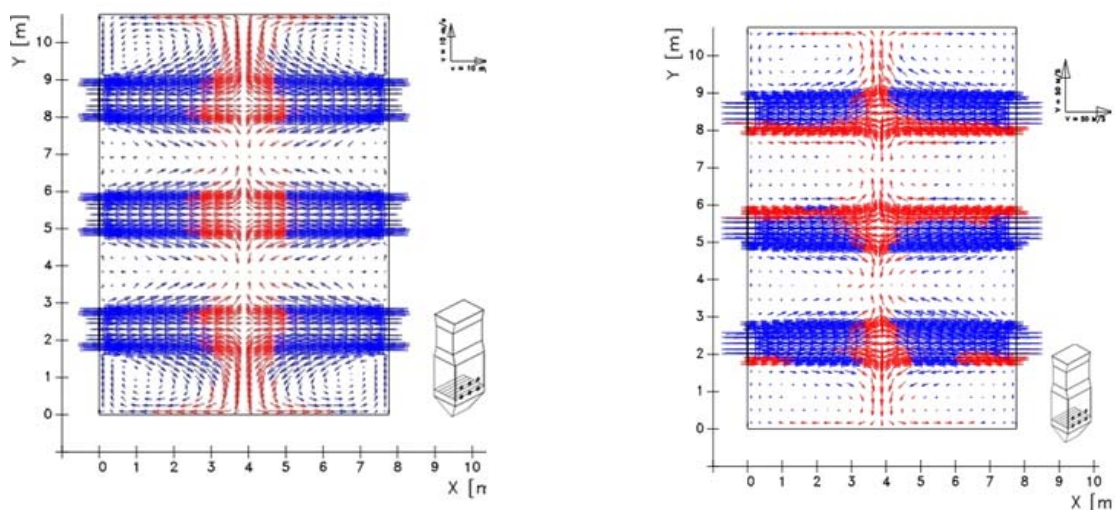
Рассмотрим суть метода термохимической плазменной подготовки угля к сжиганию. Аэросмесь (первичный воздух + угольная пыль) обычно подается по пылепроводам в горелки. Если в горелке нет установленной системы плазменного воспламенения, аэросмесь распыляется в топке, где она воспламеняется и горит по традиционной схеме, принятой в теплоэнергетике. При нагреве выделяются летучие и газифицируется углерод угля. Выделившиеся летучие и продукты газификации начинают реагировать с присутствующим в первичном воздухе кислородом, в свою очередь, дополнительно выделяя тепло и еще больше нагревая реагирующий поток пылеугольных частиц, продуктов сгорания летучих и газификации коксового остатка.

В результате на входе в камеру сгорания мы имеем нагретый до высоких (1300К и более) температур реагирующий поток частиц (основными составляющими которых являются зола и углерод) и газообразных продуктов плазменной термохимической подготовки аэросмеси. В состав последних входят: азот, водяной пар, оксид и диоксид углерода, водород, метан. При смешении с вторичным воздухом указанные продукты сгорания, нагретые до температуры воспламенения, интенсивно реагируют, выделяя тепло, и образуя конечные продукты реакций, (водяной пар и диоксид углерода). Использование различных типов горелок не вызывает отличий в механизме этого процесса. На рисунке 3 показана возможная схема компоновки плазмотронов с пылеугольными горелками различного типа, например, вихревого.

Трехмерное численное моделирование процесса горения низкосортного экибастузского угля, предварительно термохимически обработанного в топке

котла, инициируемого плазменным источником, выполнялось использованием программных комплексов «*FLOREAN*» и «*PLASMA-KOKS*» для камеры сгорания ПК39 Аксуйской ГРЭС. Было рассмотрено два случая: базовый вариант и вариант, когда 6 горелок нижнего яруса оснащены плазматронами. Результаты вычислительных экспериментов приведены на рисунках 1–6.

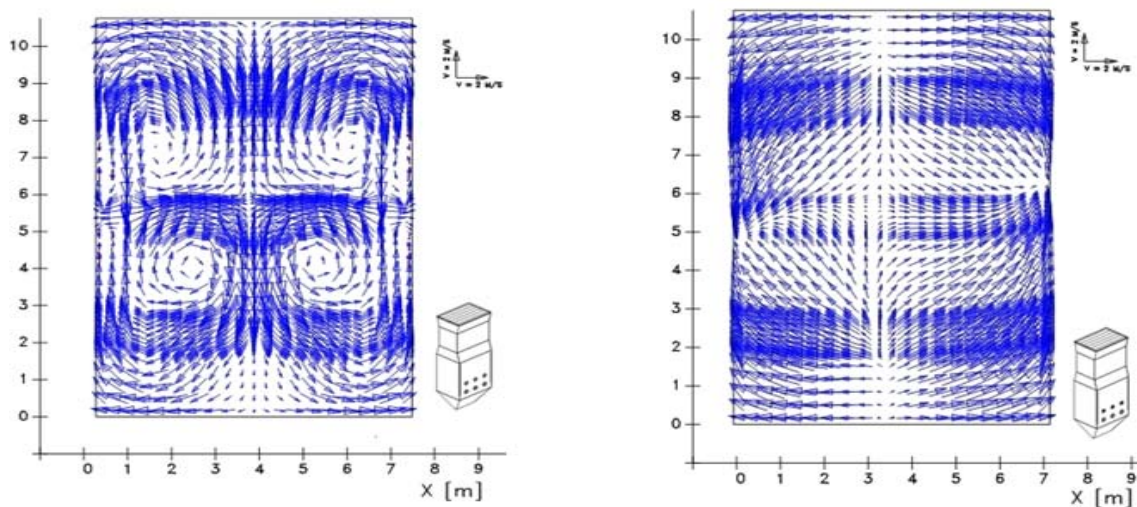
На рисунках 1, 2 представлены вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания ( $H = 7.32$  м), где расположены вихревые горелки 1(а) и на выходе из нее 2(а) для традиционного сжигания угля, а на рисунке 1(б) и 2(б)- для камеры сгорания, нижний ярус которой оборудован шестью плазменными горелками (ПТС). Мы видим, что наличие ПТС (плазменно-топливные системы) существенно отразилось на аэродинамике течения в камере сгорания.



а) Традиционное сжигание угля

б) Сжигание угля, активированного в шести ПТС

Рис. 1. Поле вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания ( $H = 7.32$  м).



а) Традиционное сжигание угля

б) Сжигание угля, активированного в шести ПТС

Рис. 2. Поле вектора полной скорости на выходе из камеры сгорания.

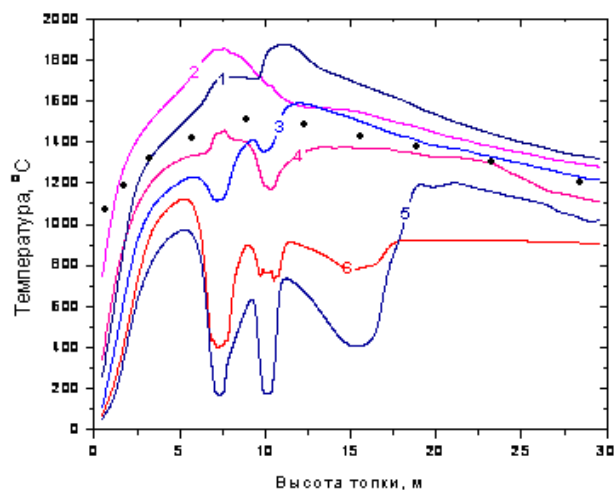


Рис. 3. Изменение температур по высоте камеры сгорания.

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, ● - эксперимент.

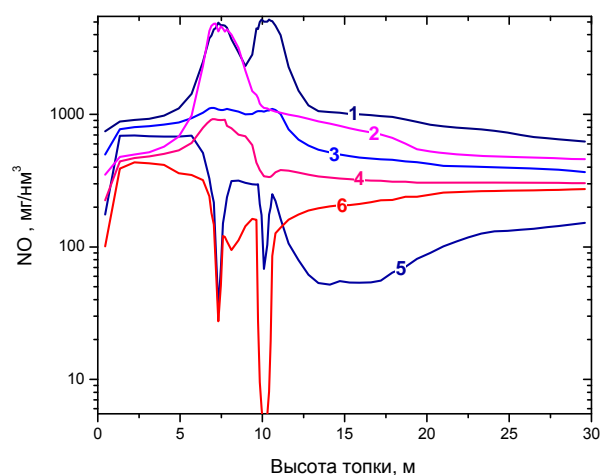


Рис. 4. Изменение концентраций NO по высоте камеры сгорания.

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.

На рисунках 3 и 4 показаны изменения по высоте камеры сгорания значений температур и концентраций NO, соответственно, 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. 3, кривые 2, 4, 6) ниже температур, рассчитанных для традиционного режима сжигания угля (рис.3, 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 ранний нагрев и воспламенение аэросмеси и соответствующее смещение фронта пламени к выходу ПТС.

Влияние ПТС на образование NO заметно также и по высоте камеры сгорания (рис. 4). 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. Следует отметить, что использование ПТС снижает концентрацию NO (рис.4 -кривые 2, 4, 6, рис. 6 б, г) даже в нижней части камеры сгорания (ниже уровня расположения ПТС). Это явление объясняется подавлением образования топливных оксидов азота внутри ПТС. Топливный (атомарный) азот выделяется в газовую фазу при нагреве угля вместе с летучими внутри ПТС.

Результаты 3D моделирования горения угля в камере сгорания, оборудованной плазматронами, представлены на рисунке 5, который на примере образования оксидов азота (NO) наглядно демонстрирует разницу между двумя режимами сжигания угля - традиционным и с предварительной плазменной активацией аэросмеси в ПТС. Мы видим, что влияние ПТС проявляется в образовании NO<sub>x</sub> в пристенной области вблизи амбразур ПТС (рис. 5 в). При традиционном сжигании угля NO<sub>x</sub> образуется в центральной зоне камеры сгорания на уровне расположения горелок (рис.5 а). Сказанное в полной мере подтверждается полем в NO<sub>x</sub> в продольном направлении (рис. 5 б, г).

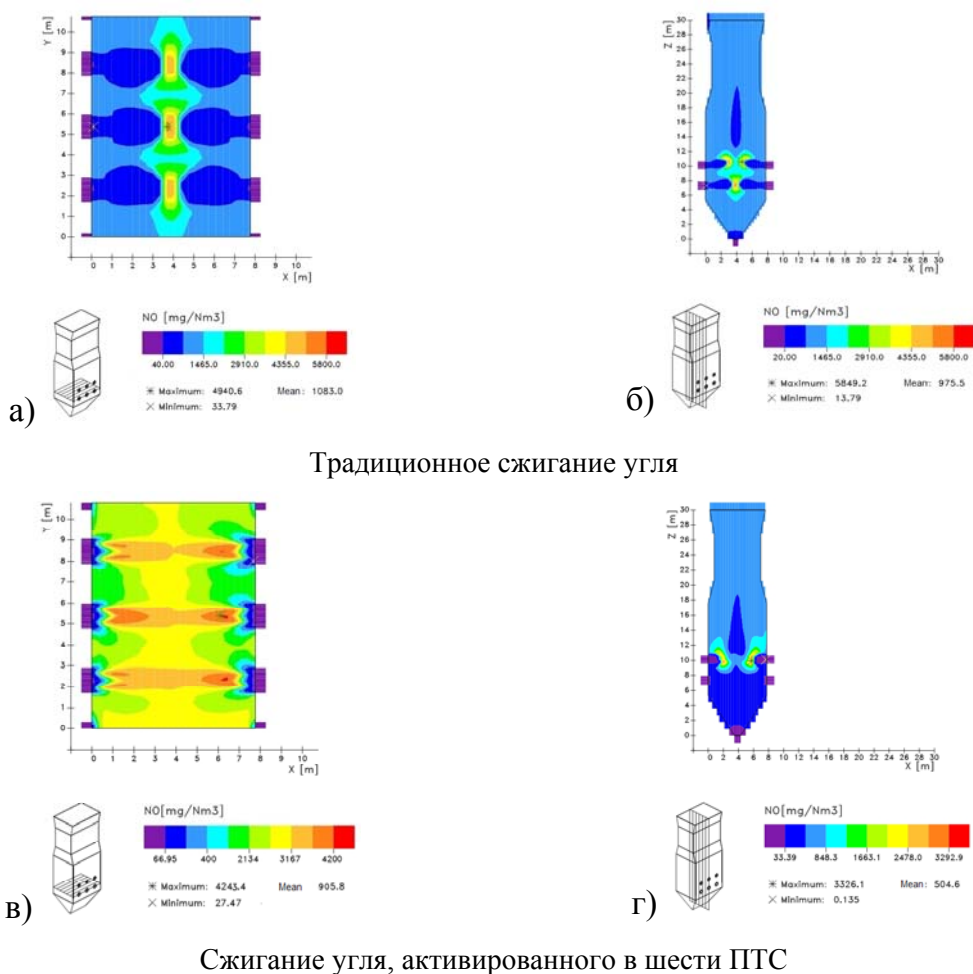


Рис. 5. Распределение концентрации оксидов азота в поперечном сечении на уровне расположения ПТС и по высоте камеры сгорания.

В таблице приведены результаты моделирования двух сравниваемых вариантов: традиционного горения угля и горения угля, поддерживаемого плазмой. Сравнение расчетных данных с экспериментальными (данные взяты в круглые скобки в таблице) для традиционного сжигания угля [5, 6] показывают удовлетворительное согласие. Разница между экспериментальными и расчетными значениями искомых величин не превышает 17%. Данные, приведенные в таблице, демонстрируют влияние плазменно-топливных систем на горение угля: уровень температур снижается на 9%, концентраций оксидов азота - на 11.5%, кислорода - на 14%, концентрация диоксида углерода увеличивается на 1,5%. Это показывает, что при поддерживаемом плазмой сжигании угля все основные характеристики процесса значительно улучшаются.

Таблица. Сравнение характеристик отходящего газа на выходе камеры сгорания

	Традиционное сжигание угля (эксперимент)	Сжигание угля, поддерживаемое плазмой
T, °C	1220 (1180)	1110
NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	368	280
CO <sub>2</sub> , кг/кг	0.185 (0.17)	0.188
O <sub>2</sub> , кг/кг	3.18 10 <sup>-2</sup> (3.5 10 <sup>-2</sup> )	1.74 10 <sup>-2</sup>

Анализ табличных данных полностью подтверждается экспериментальными [5, 6] зависимостями температур, концентраций кислорода и диоксида углерода по высоте камеры сгорания котла, представленных ранее на рисунках 3-6. Проведенное в работе исследование традиционного горения и горения термохимически газифицированного при помощи ПТС топлива показывает, что плазменная подготовка угля к сжиганию позволяет оптимизировать процесс, улучшить условия воспламенения и горения, минимизировать выбросы вредных веществ в атмосферу. Полученные результаты позволят сократить использование дорогостоящего жидкого и газообразного топлива, для розжига и стабилизации факела, существенно улучшить экологическую обстановку на угольных электростанциях за счет уменьшения вредных пылегазовых выбросов, создать высокоэффективную экологически чистую плазмохимическую технологию получения высокорекреационного топлива из казахстанских низкосортных твердых топлив.

### Литература

1. Askarova A., Bolegenova S., Lavrisheva E., Messerle V., Ustimenko A. //Improvement of Coals Combustion-Efficiency and Decrease of Harmful Emission under the Influence of Plasma//INCO-COPERNICUS-ICA2-CT-2001-2004 №10006, 117 p.
2. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б.//Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой//Теплофизика и аэромеханика, Изд-во ИТ СО РАН, г. Новосибирск. 2010, Т.17.-№3, с.467-476.
3. Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G. and Ustimenko A.B.//Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory//Journal of the Energy Institute, 2005, 78 (4), 157-171 p.

4. Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Карпенко В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимическая активация горения твердых топлив//Химия высоких энергий. – 2006. – Т.40, №2. – С.141–148.
5. Алияров Б.К.//Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях//Алматы: Ғылым, 1996. – 272 с.
6. Алияров Б.К., Устименко Б.П., Бухман М.А.//Разработка и внедрение вихревых трехканальных горелок на котлах П–39–2 Ермаковской ГРЭС: Отчет //КазНИИЭ. – Алма–Ата, 1991. – 59 с. - № Г.Р. 01910010550.